

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة
Année 2008

Faculté des Sciences de la Terre
Département de Géologie

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat

En Géologie Appliquée
Option: HYDROGÉOLOGIE

THÈME

**Vulnérabilité à la pollution, protection des ressources en eaux et
gestion active du sous système aquifère de Tébessa Hammamet
(Est Algérien)**

Par

Mlle SEGHIR KARIMA

(Ingénieur d'état en Hydrogéologie, Magister en Géologie de l'ingénieur
MACC, Université de Tébessa)

DIRECTEUR DE THÈSE : .KHERICI NACER PROFESSEUR UNIVERSITÉ DE ANNABA

Devant le jury

PRÉSIDENT : Dr. DERRADJI EI FADEL MC. UNIVERSITÉ DE ANNABA

EXAMINATEUR : Dr. BOUMAZBEUR A. MC. UNIVERSITÉ DE TÉBESSA

EXAMINATEUR : Dr. KACHI S. MC UNIVERSITÉ DE GUELMA

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à ceux qui me sont les plus chers au monde, mon Père et ma Mère en témoignant de ma grande reconnaissance à fin de m'orienter vers la bonne voie.

*A tous ceux que j'aime en particulier : mes frères (Dahmane, Abderrahmane, Bilel)
Et mes Sœurs (Meriem , Sabah , Djalila, et mes neveux youcef et yahia.*

Remerciements

Avant tout nous devons remercier le bon dieu qui nous a aidé à l'élaboration de ce travail.

Tout d'abord j'exprime ma profonde gratitude à Mr.KHERICI NACER, Professeur à la faculté des sciences de la terre à l'université Badji Mokhtar à ANNABA de m'avoir encadré et suivi mon travail avec sa rigueur scientifique et ses conseils qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Je remercie très infiniment Mr.Yves-Henri FAURE, Maître de conférence à l'université Joseph Fourier et Dr. Guidoux Cyril (LTHE, Grenoble), pour leurs assistances et leurs conseils tout au long de mon stage au sein du laboratoire; ainsi que Mr. Vincent Vallée (Université d'Avignon), Mme. Lanson M. (LGIT, Université de Grenoble), Mr. Favarger P.Y. (Laboratoire Suisse) pour leur aide pratique à la réalisation des analyses chimiques.

Je suis très reconnaissante à Mr.DERRADJI F. Maître de conférence à l'université Badji Mokhtar, Annaba, qui m'a fait le grand honneur d'être le président de mon jury.

J'adresse également mes remerciements à Mr.Boumazbeur A. Maître de conférences à l'université de Tébessa, ainsi que Mr.Kachi Slimane, Maître de conférences à l'université de Guelma d'avoir accepté d'être membres en tant que examinateurs.

Je tiens également à exprimer toute ma reconnaissance à Mme Khérici Bousnoubra Houria, Maître de conférences à l'université de Badji Mokhtar, Annaba pour les documents intéressants, ses orientations précieuses et conseils scientifiques.

Mes remerciements vont également à tout le personnel de l'institut des sciences de la terre, ainsi que tout le personnel des organismes suivants (au niveau de la wilaya de Tébessa) :

- O,R.G.M;
- DHW;
- E.P.D.M.I.A ;
- C..E.R.A.D - « Ferphos''- ;
- A.N.R.H ;
- Meteo (station météorologique) ;
- D.D.S.

Il ne serait pas question d'énumérer toutes les personnes qui, à de multiples occasions, m'ont offert leurs connaissances, leurs encouragements et leurs amitiés.

Je voudrais leur exprimer par ces lignes ma reconnaissance, c'est à ceux que je dédie ce travail.

تلخيص

عرفت مدينة تبسة خلال السنوات الأخيرة (1980-2000) جفاف حاد الذي أدى إلى هبوط عام في مستوى المياه في المائدة المائية للمنطقة، جفاف الآبار ذات العمق الضعيف، كذلك نقص على مستوى العيون، ونضوبها تأثيرات على نوعية وكمية المياه الجوفية في المنطقة تم ملاحظتها. بالتالي الدراسة الهيدروجيو كيميائية للماء وتطور نوعيته في الزمان والمكان أصبحت ضرورية خاصة إذا كانت هذه المياه موجهة لتزويد سكان المنطقة بالماء الشروب (AEP)

أربعة حملات معاينة للماء تم القيام بها أثناء فترات معينة من السنة لسنوات 2005-2006، تم من خلال تفسير المعطيات إثبات أن نسبة الملوحة عالية تصل إلى 4غ/ل وأن الناقلية الكهربائية وصل إلى 9120 ميكروسينس في الآبار وإلى 2500 في الآبار العميقة. على أثر ذلك حاولنا دراسة السلوك الكيميائي والجيوكيميائي لمياه المائدة المائية وذلك بتطبيق عدة طرق دراسة تقليدية وحديثة. نتائج الدراسات أثبتت أن أصل الملوحة في المياه راجع إلى تحلل التكوينات الجيولوجية وكذلك تأثير عدة عوامل للتلوث السطحي.

أمام خطورة الحالة التي وصلت لها المائدة المائية للمنطقة، خاصة في وقت يتزايد فيه الطلب على الماء كمادة أساسية ضرورية للحياة، أصبح من اللزوم علينا التفكير في وضع خطة تسمح لنا بحماية وزيادة مواردنا المائية. هذه الخطة تركز أساسا على حماية ما هو موجود من موارد مائية سطحية وجوفية وكذلك حسن تسييرها وإستغلالها من جهة أخرى وكذلك دراسة إمكانية تنميتها بتطبيق طرق تزويد إصطناعية وذلك بإستغلال المياه السطحية التي تتواجد في واد بوعاكوس أثناء فترات الفيضانات. برسم خريطة الخاصة بعامل مدى تعرض المائدة المائية للتلوث توضح لنا أن منطقة الدراسة مقسومة إلى ثلاث مناطق مختلفة ومتفاوتة من حيث تعرضها للتلوث السطحي.

منطقة الحمامات (ضعيفة)، منطقة عين شبرو (متوسطة)، ومنطقة تبسة (عامل قوي) يدل على تعرضها الشديد للتلوث وهذا يستوجب أخذ التدابير اللازمة لحماية الموارد المائية الموجودة فيها.

من جهة أخرى التزويد الإصطناعي بالماء للموائد المائية هو إضافة الماء في تكوينية جيولوجية ذات سماحية عالية وذلك عن طريق منشأة توضع لذلك. هذه التقنية أعطت نتائج مشجعة في مناطق عديدة من العالم. بالنسبة لمدينة تبسة إقترحنا تطبيقها وذلك بزيادة عامل مرور الماء في التربة عن طريق أحواض وآبار مملوءة بحصى.

Abstract

The area of Tébessa has been intensively drought during the last 20 years (1980/2000). This drought generally led to a general lowering of the water table; the draining of water from low depth wells, the unwatering of the pumping equipment, involving a reduction of the flow drillings; and the drying-up of the natural springs.

Quantitative and qualitative repercussions were observed on groundwater resources in the area. The hydro-geochemical survey of the groundwater quality, as well as its evolution in the time and the space, is very useful; especially when the water dedicated to drinking water supply is deteriorating continuously.

Four sampling of water associated with piezometric measurements have been realized during the high and low waters period of years 2005 and 2006. The salinity is about 4 g/l, and the electric conductivity varies between 997 and 9120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in the wells, and between 468 and 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in drillings. Thus, from the chemical and geochemical behaviour of the ground water, and by the application of the investigation methods, it was proved that the origin of water salinity is associated with the dissolution of geological formations (evaporate and carbonated), as well as it depends on the effects of anthropogenic surface pollution.

The establishment of the card of contamination indication has us permits to note that there are three distinct zones of point of view their vulnerability to the pollution, these are: zone of weak indication of contamination that characterizes the zone of Hammamet, in the west part of the city of Tébessa. Zone of contamination average indication, she/it characterizes the zone of Ain chabro, in the central part of the plain of Tébessa. It is therefore fairly vulnerable to the pollution; and the zone of contamination strong person indication that characterizes the part is from the plain of Tébessa. It shows well that this part of the plain is very vulnerable to the pollution. It requires measures of protections therefore very rapids. Currently, resources in water underground are limited in the region of Tébessa. Evidently, this situation is the result of one period of very long drought, during these last years.

Before the gravity of this situation that intervenes in one time where the needs in water are in continuous increase it is important to put a politics that would permit to increase our resources in water in place. This last, must based on the one hand, on the protection of the existing resources, and on the artificial refill of the existing underground water on the other hand. The artificial refill of the underground water, consist in introducing water in a permeable formation, through the intermediary of a device arranged this effect.

This new technique gave positive and very encouraging results in different countries in the world. For the particular case of the Tébessa, the technique is based on the increase of the infiltration efficient of soil, of the site in question, by vertical galleries of depth 30 m filled by gravels (2-5 mm).

Résumé

La région de Tébessa a connu au cours des dernières années (1980/2000) une sécheresse très intense, qui s'est traduite par : un rabattement général du niveau statique des nappes, un assèchement des puits de faible profondeur, et un dénoyage des équipements de pompage entraînant une réduction des débits d'exhaure et un tarissement des sources.

Des répercussions quantitatives et qualitatives sur les eaux souterraines de la région ont été observées. L'étude hydrogéochimique de l'eau ainsi que l'évolution de sa qualité dans le temps et dans l'espace s'avère très utile, surtout quand il s'agit d'une eau destinée à l'Alimentation en Eau Potable (AEP) des citoyens, dans une région souffrant de problèmes de pollution et de dégradation de la qualité de l'eau.

Quatre campagnes d'échantillonnage d'eau et des mesures piézométriques ont été réalisées pendant les périodes de Hautes et Basses Eaux des années 2005, 2006. Il a été constaté que la salinité est de l'ordre de 4 g/l, et que la conductivité électrique varie entre 997 et 9120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans les puits et entre 468 et 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans les forages. Nous avons essayé d'analyser le comportement chimique et géochimique des eaux de la nappe avec l'application de plusieurs méthodes d'investigation. Les résultats obtenus montrent que l'origine de la salinité des eaux est liée à la dissolution des formations géologiques ainsi qu'aux effets de pollution anthropique de surface.

Devant la gravité de cette situation, qui intervient dans un temps où les besoins en eau sont en augmentation continue, il est important de mettre en place une politique, qui permettrait de protéger et d'accroître nos ressources en eau. Cette stratégie, doit reposer sur la protection et la meilleure gestion des ressources existantes d'une part, et sur l'étude de la possibilité de les recharger artificiellement par les eaux de surface, qui circulent dans les oueds pendant les périodes des crues et des pluies orageuses, d'autre part.

L'établissement de la carte d'indice de contamination, nous a permis de constater qu'il y a trois zones distinctes de point de vue de leur vulnérabilité à la pollution, ce sont : zone de faible indice de contamination qui caractérise la zone de Hammamet, dans la partie ouest de la ville de Tébessa. Zone de moyenne indice de contamination, elle caractérise la zone de Ain chabro, dans la partie centrale de la plaine de Tébessa ; et la zone de fort indice de contamination, qui caractérise la partie Est de la plaine de Tébessa. Cela montre bien que cette partie de la plaine est très vulnérable à la pollution. Elle nécessite donc des mesures de protections très rapides.

La réalimentation artificielle des nappes souterraines, consiste à introduire de l'eau dans une formation perméable, par l'intermédiaire d'un dispositif aménagé à cet effet. Cette technique a donné des résultats positifs et très encourageants dans différents pays dans le monde. Pour le cas particulier de la wilaya de Tébessa, nous avons proposé une technique basée essentiellement sur l'augmentation de l'infiltration efficace du sol, du site en question, par des bassins d'infiltrations et des galeries verticales de profondeur 30 m remplies par des graviers (\varnothing 2-5 mm).

Avant propos

La préservation de l'environnement est une préoccupation croissante du monde scientifique et industriel issue de la prise de conscience de la nécessité de maîtriser l'impact des phénomènes naturels et anthropiques sur la qualité du milieu dans lequel l'homme évolue.

Dans ce contexte, l'eau est un constituant primordial du milieu naturel et en particulier du milieu souterrain. A ce titre on pourrait croire que l'homme la gère, l'économise, la préserve. Or, les hommes de tous les pays ont été négligents et imprévoyants. Si on n'améliore pas considérablement et de manière active la gestion des ressources en eau, l'avenir de l'espèce humaine et de bien d'autres espèces est compromis. Aujourd'hui, plus de 2 milliards d'hommes n'ont pas accès à l'eau potable, et le développement accéléré ne fait qu'accroître une demande mal ou pas satisfaite (Michel Detay, 1997)

L'eau est l'élément de base de la vie sur la planète, c'est la raison pour laquelle l'homme a tenté de maîtriser cette ressource primordiale, malheureusement, depuis quelques décennies l'action de l'homme dégrade de plus en plus l'environnement. L'eau qui est le vecteur privilégié de nombreuses formes de pollution n'échappe pas à ces atteintes. De plus l'accroissement exponentiel de la démographie et des activités industrielles, et agricoles au cours de ce siècle a entraîné dans certaines régions une pénurie quantitative et qualitative des eaux mobilisables.

Nous sommes arrivés à un stade où il n'est plus possible de prélever de l'eau n'importe où et n'importe comment : une gestion rationnelle et intégrée de toutes les ressources en eau est devenue une nécessité absolue afin de préserver cet héritage naturel indispensable à l'homme.

Comme dans toutes les régions semi arides notamment du Maghreb, la région du grand bassin de Mellègue a connu au cours des 20 dernières années une sécheresse très intense. Cette dernière a été caractérisée par un déficit pluviométrique considérable, et a eu un impact très négatif sur les régimes d'écoulements des oueds et des sources, et par conséquent sur l'alimentation des nappes aquifères. Ce déficit hydro- pluviométrique s'est répercuté sur l'ensemble des activités socio-économiques de ces régions, surtout sur son développement agricole. Par ailleurs, ce phénomène a eu ainsi un impact écologique négatif en dégradant, en général, l'environnement et en favorisant notamment la pollution des eaux chimiquement et bactériologiquement, et par conséquent, le dépérissement du milieu naturel.

Il faut souligner l'importance de la pluviométrie et surtout de l'époque à laquelle la pluie tombe. En effet, la pluie qui tombe en été est pratiquement ré évaporée dans les jours qui suivent, la température de l'air étant relativement élevée, et la végétation consomme pour sa part une partie importante de l'eau tombée par évapotranspiration. On conçoit qu'un orage brutal ne permet pas à l'eau de s'infiltrer, elle va ruisseler et s'écouler vers la mer par rivières. On peut très bien accepter de voir le niveau d'une nappe baisser de quelques mètres en été, si l'on est sûr que ce niveau va remonter en hiver.

La technique de réalimentation artificielle des nappes a permis, dans de nombreux cas dans le monde, d'augmenter la quantité d'eau de bonne qualité, disponible en été, et d'améliorer souvent la qualité naturelle de la nappe.

Objets de l'étude

A cet effet, et dans le cadre de la stratégie globale de maîtrise et de mobilisation des ressources hydriques existantes, au niveau de la région d'étude, nous avons proposé ce thème d'étude afin d'actualiser nos connaissances hydrogéologiques sur la nappe alluviale Tébessa Hammamet. Au moyen des données que nous avons pu acquérir, nous avons tracé les objectifs suivants :

- définir les potentialités aquifères de la région d'étude ;
- actualiser les connaissances, déjà acquises, sur les caractéristiques chimiques et bactériologiques de l'eau souterraine qui définissent sa qualité ;
- analyser l'origine de la salinité des eaux souterraines au niveau de la plaine ;
- étudier la possibilité d'accroître les ressources en eaux par la recharge artificielle de la nappe (par les eaux de surface de oued Bouakous en période de crue) ;
- proposition d'un ouvrage de recharge.

Pour cela, nous avons tracé un programme de prélèvement in situ (sur terrain) au cours des périodes Hautes et basses eaux (2004, 2005, 2006), et ce, en collaboration avec l'Agence Nationale des Ressources Hydriques de la w. de Tébessa (A.N.R.H), la direction de la santé de la w. de Tébessa (laboratoire d'hygiène), le laboratoire de l'Institut des Sciences de la Terre, Université de Tébessa :

- des prélèvements des échantillons d'eau pour les analyses physico-chimiques et bactériologiques ;
- des campagnes piézométriques ont été réalisées sur l'ensemble des points d'eau existants dans la région d'étude ;
- des mesures de débit d'eau écoulé dans l'oued Bouakous ;

La méthodologie adoptée pour ce travail se présente en trois grandes parties essentielles :

1^{ère} Partie : Identification géographique, géologique, hydro climatologique et hydrogéologique de la région d'étude : qui comprend :

- Situation géographique et aperçue géomorphologique ;
- Aperçu géologique ;
- Étude climatologique ;
- Étude hydrogéologique.

2^{ème} Partie : Étude de la qualité hydro chimique et bactériologique, vulnérabilité à la pollution et protection des ressources en eau : qui comprend :

- Étude de la qualité hydro chimique des eaux ;
- Qualité bactériologique des eaux souterraines et de surface ;
- Vulnérabilité à la pollution et protection.

3^{ème} Partie : Amélioration en quantité et qualité des eaux de la nappe alluviale Ain chabro-Tébessa : qui comprend :

- Gestion active des aquifères par la recharge artificielle : Avantages et inconvénients ;
- Étude de faisabilité d'application d'une technique de recharge artificielle dans la région d'étude.

Finalement, nous donnerons une conclusion générale sur l'ensemble de l'étude dans laquelle, nous mentionnerons :

- les difficultés rencontrées en suggérant, dans le cas d'une étude approfondie, un plan de suivi et de travail complémentaire ;
- Des recommandations générales qui seront proposées à la fin de cette étude.

SOMMAIRE

Remerciement	3
Résumés	4
Avant propos	7
Objets de l'étude	8
Sommaire	9
Liste des figures	13
Liste des tableaux	16
Première Partie	
Identification géographique, géologique, hydro climatologique et hydrogéologique de la région d'étude	
Chapitre I : Situation géographique, aperçu géomorphologique	
1. Situation géographique	20
2. Réseau hydro graphique	20
3. Couverture végétale	21
4. Géomorphologie	22
Chapitre II: Aperçu géologique	
1. Introduction	24
2. Stratigraphie	24
2.1. Secondaire	24
2.2. Tertiaire	25
2.3. Quaternaire	26
3. Tectonique	28
3.1. Plissements : (Tectonique souple)	29
3.2. Failles : (Tectonique cassante)	29
3.3. Fossés d'effondrements	29
3.4. Diapirisme	29
4. Conclusion	31
Chapitre III : Étude Climatologique	
1. Introduction	33
1.1. Continentalité pluviale moyenne	33
1.2. L'indice d'aridité de Martonne	34
2. Etude des paramètres climatiques	35
2.1. Etude des précipitations	35
2.2. Etude de la Température	37
2.2.1. Températures moyennes mensuelle	38
2.3. Diagramme Ombrothermique de la station de Hammamet	38
2.4. L'humidité	40
2.5. Le vent	40
2.6. L'insolation	40
2.7. L'évaporation	40
2.8. Nébulosité	40
2.9. La neige	40
2.10. Les crues	40
3. Bilan hydrique	40
3.1. Evapotranspiration Potentielle (ETP)	40
3.2. Evapotranspiration Réelle (ETR)	41
3.3. Calcul des réserves facilement utilisables (RFU)	41
3.4. Estimation du ruissellement et de l'infiltration	42
3.5. Interprétation du bilan hydrique	44

4. Conclusion	44
---------------	----

Chapitre IV. Etude hydrogéologique

1. Introduction	46
2. Description lithologique de la nappe aquifère Ain chabro -Hammamet	46
2.1. Identification des différents niveaux aquifères	46
a/ Milieu Poreux	46
b/ Milieu Fissuré	46
3. Conditions aux limites du système	46
4. Carte piézométrique	47
4.1 Interprétation de la carte piézométrique établie	48
5. Étude des paramètres hydrodynamiques	50
5.1. Carte de la perméabilité	50
5.2. Carte des transmissivités	50
6. Interprétation des coupes hydrogéologiques réalisées	51
7. Étude de la variation du niveau statique en fonction de Précipitation	52
8. Bilan du système aquifère	54
9. Conclusion	55

Deuxième Partie

Étude de la qualité hydro chimique et bactériologique, Vulnérabilité à la pollution et protection des ressources en eau

1. Étude de la qualité hydro chimique des eaux

1. Introduction	58
2. Paramètre de qualité	58
2.1. Détérioration de la qualité	58
3. Apports anthropiques	58
3.1. Les Rejets urbaines et industrielles	59
3.2. L'agriculture	59
4. Les apports naturels	59
5. Méthodologie de travail	60
5.1. Prélèvements	60
5.2. Mesures <i>in situ</i>	60
5.3. Analyses des éléments chimiques	60
6. Étude des résultats des analyses chimiques	60
6.1. Étude statistique	61
6.1.1. Caractéristiques physico - chimiques des eaux (mesure <i>in situ</i>)	61
6.1.2. Sels dissous	64
6.1.2.1. Les éléments majeurs	64
6.1.2.2. Éléments mineurs naturels	68
6.1.2.3. Éléments métalliques en traces	69
6.2. Faciès chimiques des eaux	70
6.2.1. Les eaux superficielles (Source Bouakous, O_{aval} , O_{amont})	70
6.2.2. Les eaux souterraines (Puits et Forages)	71
6.3. Traitement statistique des données physico-chimiques	73
6.3.1. Analyse en Composante Principale (ACP)	73
6.4. Cartographie des principaux éléments chimiques	74
6.4.1. Carte des Paramètres physico-chimiques	74
6.4.2. Carte des éléments majeurs (cations et anions)	76
6.4.3. Carte des éléments mineurs	82
6.4.4. Carte des éléments métalliques en traces	82
7. Étude de l'origine des éléments chimiques	84
a. Le couple Na^+ / Cl^-	84
b. Origine du Calcium	85

8. Étude des rapports caractéristiques	85
a. La relation Cl^-/SO_4^{2-} - conductivité électrique	85
b. La relation $HCO_3^-/(Cl^- + SO_4^{2-})$ – conductivité électrique	86
c. Le rapport Mg^{2+}/Ca^{2+}	86
d. Le rapport Cl^-/HCO_3^-	86
9. Étude géochimique de l'évolution des minéraux	87
10. Conclusion	88

2. Qualité bactériologique des eaux souterraines et de surface

1. Introduction	90
2. Étude relation oued-nappe	90
2.1. Composition lithologique des berges et du lit de l'oued	91
3. Caractères biochimiques des germes qu'on recherche habituellement dans les eaux	92
3.1. Coliformes	92
3.2. Les streptocoques	93
2.3. <i>Les salmonella</i>	93
2.4. Le vibrion cholérique	93
4. Les maladies d'origine microbienne associées à l'eau	93
5. Analyse bactériologique	94
6. Résultats d'analyse	94
7. Interprétation des résultats bactériologiques	94
8. Calcul de l'indice de qualité microbiologique (IQM)	95
9. Conclusion	96

3. Vulnérabilité à la pollution et protection des ressources en eau

1. Introduction	98
2. Principaux origine des pollutions	99
3. Indice de contamination de la nappe alluviale Tébessa Hammamet	100
4. Pouvoir épurateur du sol contre les pollutions éventuelles	102
4.1 Rôle protecteur des sols	102
4.2 Rôle épurateur du couvert végétal et des organismes	102
4.3 Autoépuration biologique des eaux souterraines	103
4.4. Estimation du pouvoir épurateur (Méthode de Rhèse, 1977)	103
4.5. Calcul du pouvoir épurateur du sol de la région d'étude	104
5. Protection des ressources en eaux	105
5.1. Notions de périmètres de protection	105
La zone de protection immédiate	105
La zone de protection rapprochée	105
La zone de protection éloignée	105
6. Conclusion	106

Troisième Partie

Amélioration en quantité et qualité des eaux de la nappe alluviale Ain chabro-Tébessa

I. Gestion active des aquifères par la recharge artificielle (Bibliographie)

1. Introduction	108
2. L'alimentation naturelle des aquifères	108
3. Alimentation artificielle des nappes	109

3.1. Objectifs et applications	109
4. Conditions générales d'utilisation de l'alimentation artificielle	110
4.1. Conditions hydrologiques (source d'alimentation)	110
4.2. Conditions hydrogéologiques et hydrodynamiques (réservoirs souterrains)	111
5. Les différents types de recharge	111
5.1. Recharge par injection directe	111
5.2. Recharge par bassins d'infiltration	113
5.2.1. Les différents types de bassins d'infiltration	114
5.3. Recharge induite	116
5.4. Les autres dispositifs de recharge	116
5.4.1. Inondation et irrigation	116
5.4.2. Canaux de dérivations	117
5.4.3. Aménagements de cours d'eau	117
5.4.4. Puits filtrants et fosses	117
5.4.5. Méthodes mixtes	117
5.4.6. Récupération des eaux météoriques	118
II. Étude de faisabilité de la recharge artificielle dans la région d'étude	118
1. Caractérisation hydrogéologique (la nappe à recharger)	120
2. Caractérisation hydro chimique des eaux (compatibilité de la qualité)	121
3. Qualité bactériologique des eaux	122
4. Besoins en eau de la région	122
5. Source d'alimentation (bassin versant de bouakous)	124
III. Proposition de la réalimentation artificielle de la nappe Ain chabro-Tébessa	127
1. Plan général de la technique de recharge artificielle proposée	128
Conclusion	131
Conclusion générale	133
Références bibliographiques	137
Annexes	142

Listes des figures

Première Partie

Identification géographique, géologique, hydro climatologique et hydrogéologique de la région d'étude

Chapitre I : Généralités et situation géographique

Figure 1: Situation géographique de la région d'étude

Figure 2: Réseau hydrographique de la région d'étude

II. Aperçue géologique

Figure 1 : Coupe géologique au pied de Dj. Belkif

Figure 2: Carte Géologique de la région d'étude [carte dressée par MM.P.Deleau et R.Laffitte, publiée en 1951]

Figure 3 : Carte structurale de la région d'étude [W.M.Kowalski, A.R.Boudoukha, M.L.Hemila et André Pharissat ,1997]

III. Étude climatologique

Figure 1 : Précipitation interannuelle de la région de Tébessa sur une période de 22 ans (1983/1984 - 2004/2005)

Figure 2: Précipitation interannuelle de la région de Hammamet sur une période de 22 ans (1983/1984 - 2004/2005)

Figure.3: Variation des précipitations moyenne mensuelle de la région de Hammamet sur une période de 21 ans (1983/1984 - 2004/2005)

Figure 4: Variation des précipitations moyennes mensuelles de la région de Tébessa sur une période de 22 ans (1983/1984 - 2004/2005)

Figure 5 : Courbe Ombrothermique de la région de Hammamet (1984/2004)

Figure 6: Courbe Ombrothermique de la région de Tébessa (1984/2004)

Chapitre IV. Aperçue Hydrogéologique

Figure 1 : Carte des conditions aux limites [DHW,Tébessa,1976]

Figure .2: Carte d'inventaire des points d'eau existants dans la région d'étude

Figure 3 : Carte piézométrique de la zone d'étude (Période Hautes Eaux Mai, 2005)

Figure 4 : Carte piézométrique de la zone d'étude (Période Hautes Eaux Mai, 2006)

Figure 5 : Carte perméabilité de la zone d'étude ($\times 10^{-4}$ m/s)

Figure 6 : Carte de transmissivité de la zone d'étude ($\times 10^{-3}$ m²/s)

Figure 7 : Coupe hydrogéologique schématique

Figure 8 : Coupes hydrogéologiques schématiques dans la région d'étude

Figure 9 : Coupe géoélectrique transversale ouest dans la zone de Ain Chabro

Figure 10: Variation du niveau piézométriques en fonction des précipitations mensuelles (Ain-Chabro) [77,78,79,80,81,82]

Figure 11: Variation du niveau piézométriques en fonction des précipitations mensuelles (Hammamet) [77,78,79,80,81,82]

Deuxième Partie

Étude de la qualité hydro chimique et bactériologique, Vulnérabilité à la pollution et protection des ressources en eau

1. Étude de la qualité hydro chimique des eaux

Figure 1 : cycle de l'azote [23]
 Figure 2 : Diagramme de Piper des eaux de surface (Oam,Oav ,2004/2005) [78,79,80,81]
 Figure 3. Diagramme de Piper des eaux de souterraine (Mai, Nov.2005) [78,79,80,81]
 Figure 4. Diagramme de Piper des eaux de souterraine (Mai, Sept..2006) [78,79,80,81]
 Figure 5. : Analyse en Composante Principale (ACP) [78,79,80,81]
 Figure 6. : Carte de conductivité
 Figure 7 : Carte de la salinité
 Figure 8 : Carte de pH
 Figure 9 : Carte de Oxygène dissous
 Figure 10 : Carte de Calcium
 Figure 11 : Carte de Magnésium
 Figure 12 : Carte de Sodium
 Figure 13 : Carte des Chlorures
 Figure 14 : Carte de Potassium
 Figure 15 : Carte des Sulfates
 Figure 16 : Carte des Bicarbonates
 Figure 17 : Carte des Nitrates
 Figure 18 : Carte du Silicium
 Figure 19 : Carte des teneurs en Fer
 Figure 20: Carte de Manganèse
 Figure 21 : échange de base [78,79,80,81]
 Figure 22 :A,B : origine du calcium[78,79,80,81]
 Figure 23 (A, B, C, D) : origine de la salinité en fonction des rapports caractéristiques

2. Qualité bactériologique des eaux souterraines et de surface

Figure 1 : Relation oued-Nappe [78,79,80,81]
 Figure 2. Écoulement d'eau dans oued Bouakous après une pluie orageuse (Décembre, 2004) [78,79,80,81]
 Figure 3,4 : Contamination du lit aval de Oued Bouakous par les déchets de bitume (Décembre, 2004) [78,79,80,81]
 Figure (5-8) : Rejet des déchets urbains et industriels dans oued Bouakous [78,79,80,81]
 Figure 9 : courbe de variation des germes aérobies, coliformes totaux, fécaux) en fonction des points d'eau [78,79,80,81]

3. Vulnérabilité à la pollution et protection des ressources en eau

Figure 1 : Infiltration des polluants dans la zone non saturée et la zone saturée [36].
 Figure 2 : Principales causes de pollution [36]
 Figure 3 : Carte d'indice de contamination pour la campagne de Mai 2005
 Figure 4 : Carte d'indice de contamination pour la campagne de Novembre 2005
 Figure 5 : Carte d'indice de contamination pour la campagne de Mai 2006
 Figure 6 : Carte du pouvoir épurateur de la zone non saturée dans la région d'étude.
 Figure 7 : Carte du remplissage quaternaire de la plaine Tébessa-Hammamet [DHW. Tébessa
 Figure 8 : Principe de trois périmètres de protection des captages des eaux [36,53]

Troisième Partie

Amélioration en quantité et qualité des eaux de la nappe alluviale Ain chabro-Tébessa I. Gestion active des aquifères par la recharge artificielle (Bibliographie)

Figure 1: Diagramme présente les différents types de recharge naturelle d'une nappe aquifère

Figure 2 : Recharge artificielle par injection directe [Seghir K. 2008]

Figure3: Injection directe de l'eau traitée par forage [86]

Figure 4 : Recharge artificielle par bassin d'infiltration [Seghir K. 2008]

Figure 5 : Diagramme présente le principe d'une station de recharge artificielle par bassins d'infiltration

Figure 6 : Plan et coupe d'un bassin d'infiltration [Bize,1972]

Figure 7: Recharge artificielle par plusieurs bassins de décantation et d'infiltration

Figure 8 : Différentes méthodes de la recharge artificielle des nappes alluviales [Detay, M., 1997, modifié par Seghir K.]

Figure 9 : Organigramme aide à la décision pour la recharge artificielle des nappes (de Dillon and Pavelic, 1996) [84](traduit et modifié par Seghir K.)

Figure 10: Abaissement du niveau statique dans les forages de la région d'étude

Figure 11: Diminution de débit d'exploitation en fonction du niveau statique

Figure 12,13,14: Présentation par diagramme Piper de la qualité chimique des eaux de l'oued bouakous et le plus proche forage (F1)

Figure 15 : Évolution de la production d'eau dans la région de Tébessa

Figure 16 : Évolution de la production d'eau dans la région de Hammamet

Figure 17 : Volume produit et Volume distribué de l'année 2004 à Tébessa

Figure18: carte topographique de la région d'étude (Tébessa_Hammamet)

Figure 19 : Débits des crues enregistrés [ANRH,W.Tébessa]

Figure 20 : Écoulement de l'eau dans le lit d'Oued Bouakous après la crue

Figure21: Niveau de l'eau dans le lit d'Oued Bouakous pendant et après une crue

Figure 22: Niveaux d'eau dans l'Oued pendant et après la crue

Figure 23 : Lac d'eau formé en amont d'oued Bouakous après une forte pluie dans la région de Hammamet (Février/Mars 2005)

Figure 24,25 : Plan schématique de l'ouvrage proposé.

Figure 26 : Ouvrage proposé en multipliant le nombre des bassins d'infiltration

Listes des Tableaux

Première Partie

Identification géographique, géologique, hydro climatologique et hydrogéologique de la région d'étude

Chapitre I : Généralités et situation géographique

II. Aperçue géologique

Tableau 1 : Colonne stratigraphique de la région d'étude [d'après G.Durozoy, F..Morel,1956]

III. Étude climatologique

Tableau 1. : Les coordonnées Lambert des stations de mesures [ANRH, Tébessa]

Tableau 2. : Coefficient pluviométrique de la région de Hammamet

Tableau 3. : Coefficient pluviométrique de la région de Tébessa

Tableau 4. : Variation de précipitation moyenne mensuelle de la station de Hammamet (1983/1984-2003/2004)

Tableau 5 : Variation de précipitation moyenne mensuelle de la station de Tébessa (1983/1984-2003/2004)

Tableau 6: Variation des températures moyennes mensuelles (1983/1984-2003/2004)

Tableau 7 : Données du diagramme Ombrothermique pendant une période de 22 ans 1983/84 04/05 de la station de Hammamet

Tableau 8 : Données du diagramme Ombrothermique pendant une période de 22 ans « 83/84-04/05 » de la station de Tébessa

Tableau 9: Bilan hydrique d'une période de 5 ans (1999/2000 / 2003-2004) pour les deux stations

Tableau 10: Bilan hydrique d'une période de 22 ans (1983/1984 / 2004-2005) pour les deux stations

Tableau 11: Bilan hydrique de la région de Hammamet pour l'année 2002/2003

Tableau 12 : Bilan hydrique de la région de Tébessa, de l'année agricole 2002/2003

Chapitre IV. Étude Hydrogéologique

Tableau 1 : Description de la lithologie de la zone d'étude (Ain-chabro_Hammamet)(Annexe)

Tableau 2. : Bilan du système aquifère de la région d'étude

Deuxième Partie

Étude de la qualité hydro chimique et bactériologique, Vulnérabilité à la pollution et protection des ressources en eau

1. Étude de la qualité hydro chimique des eaux

Tableau 1: résultats des analyses chimiques de l'eau des rejets urbains et industriels dans la région d'étude [35]

Tableau 2 : variation de la température pendant le suivi (2005 /2006)

Tableau 3 : variation de la conductivité pendant le suivi (2005 /2006)

Tableau 4: variation de la minéralisation pendant le suivi (2005 /2006)

Tableau 5 : Classement de la minéralisation des eaux de la nappe Ain Chabro-Hammamet (Mai 2006)

Tableau 6 : variation de la salinité pendant le suivi (2005 /2006)

Tableau 7: variation de TDS pendant le suivi (2005 /2006)

Tableau 8: variation de pH pendant le suivi (2005 /2006)
 Tableau9 : variation de (O₂) pendant le suivi (2005 /2006)
 Tableau 10: variation des teneurs en calcium pendant le suivi (2005 /2006)
 Tableau 11: variation des teneurs en Magnésium pendant le suivi (2005 /2006)
 Tableau 12: variation des teneurs en sodium (Na⁺) pendant le suivi (2005 /2006)
 Tableau 13: variation des teneurs des chlorures (Cl⁻) pendant le suivi (2005 /2006)
 Tableau 14 : variation des teneurs du potassium (K⁺) pendant le suivi (2005 /2006)
 Tableau 15: variation des teneurs des sulfates (SO₄²⁻) pendant le suivi (2005 /2006)
 Tableau 16 : variation des teneurs des Bicarbonates (HCO₃⁻) pendant le suivi (2005 /2006)
 Tableau 17: variation des teneurs des Nitrates (NO₃⁻) pendant le suivi (2005 /2006)
 Tableau 18 : variation des teneurs du Silicium (Si⁺²) pendant le suivi (2005 /2006)
 Tableau 19: variation des teneurs du Fer pendant le suivi (2005 /2006)
 Tableau 20: Variation des teneurs du Manganèse pendant le suivi (2005 /2006)
 Tableau 21: Classement des faciès chimique des eaux de la région d'étude
 Tableau 22: Indice de saturation calculé [78,79,80,81]

2. Qualité bactériologique des eaux souterraines et de surface

Tableau 1 : Les maladies d'origine microbienne associées à l'eau [19]
 Tableau 2 : Classement des paramètres microbiologique
 Tableau 3 : Indice de Qualité Microbiologique
 Tableau 4: Application de la méthode de calcul de l'indice de qualité microbiologique

3. Vulnérabilité à la pollution et protection des ressources en eau

Tableau 1 : Classement des indices de contamination (Pr. Khérici N., 1993)
 Tableau 2 : Pouvoir épurateur du sol dans la couverture (sol+zone non saturée) (selon REHSE, 1977)
 Tableau 3 : Pouvoir épurateur du sol dans l'aquifère (REHZE, 1977)

Troisième Partie

Amélioration en quantité et qualité des eaux de la nappe alluviale Ain chabro-Tébessa

I. Gestion active des aquifères par la recharge artificielle (Bibliographie)

Tableau 1 : Variation de niveau statique des forages existants dans la nappe
 Tableau 2 : Bilan d'eau Ressources-Besoins dans la région de Tébessa.

Première Partie

Identification géographique, géologique, hydro climatologique et hydrogéologique de la région d'étude

Chapitre I

Situation géographique, Aperçu géomorphologique

1. Situation géographique

La région d'étude se situe à l'extrémité Nord-ouest de la W. de Tébessa, et elle appartient au domaine de l'Atlas Saharien Oriental, aux confins Algéro-Tunisiens, précisément, aux monts de Tébessa, qui constitue la partie orientale des monts de Nemmencha (Figure 1).

Notre étude couvre la zone de Tébessa - Hammamet (Youks les Bains), d'une superficie d'environ 420 km², dont les limites administratives peuvent être définies comme suit [1,18] :

- au Nord-Ouest : par la ville de Meskiana (Willaya de Oum el Bouaghi) ;
- au sud-Est : par la ville de Tébessa ;
- à l'Ouest : par la daïra de Cheria et Bir Mokaddem.

Concernant les limites géomorphologiques, on peut citer :

- au Nord-Ouest : Dj.belkfif.
- au Sud : Dj. Gaaga, DjBouzian, Dj. Mestiri, et Dj.Tazbent ;
- à l'Est : Dj. Guenifida, Dj ezitouna ;
- à l'Ouest : Dj. Troubia, Dj Essen ;

La zone d'étude est comprise entre les coordonnées géographiques suivantes :

- Longitude 7° 50- 8° 10 Est.
- Latitude 35° 24 – 35° 35 Nord.

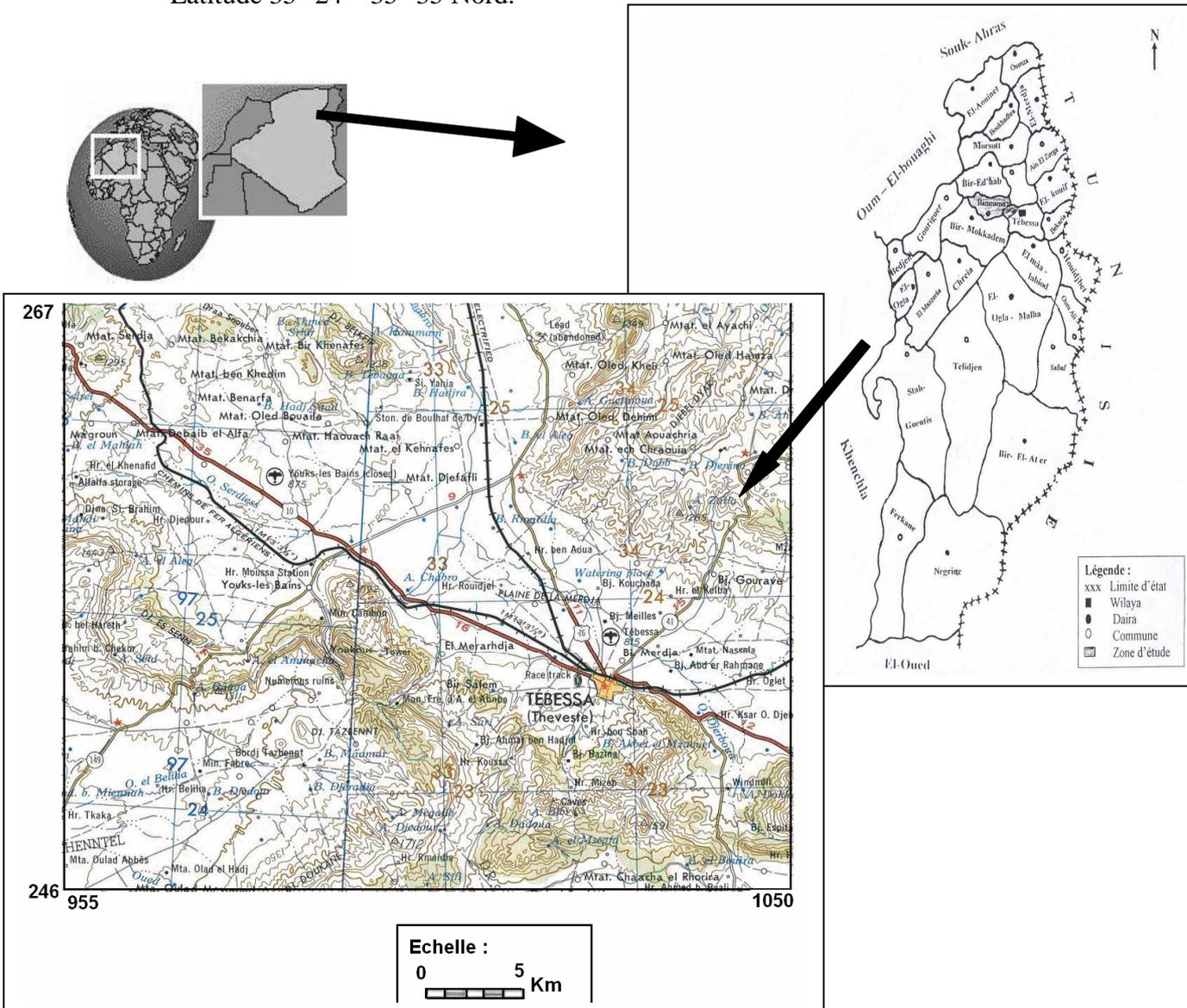


Figure 1. : Situation géographique de la région d'étude [78,79,80,81]

2. Réseau hydro graphique : La région d'étude est drainée par un certain nombre d'oueds dont les plus importants sont ceux de Chabro et Bouakous. Elle est marquée par un réseau hydrographique

bien développé avec de nombreux oueds (Fig. 2), dont l'écoulement est temporaire. Ces oueds sont les suivants : oued Serdiess, oued Ksob, ouest Bouakous, oued boudiss, oued Chabro. L'oued Bou Akous rejoint l'oued Ksob qui se jette dans oued Méllégue, lequel s'inscrit dans le grand bassin de Medjerda.

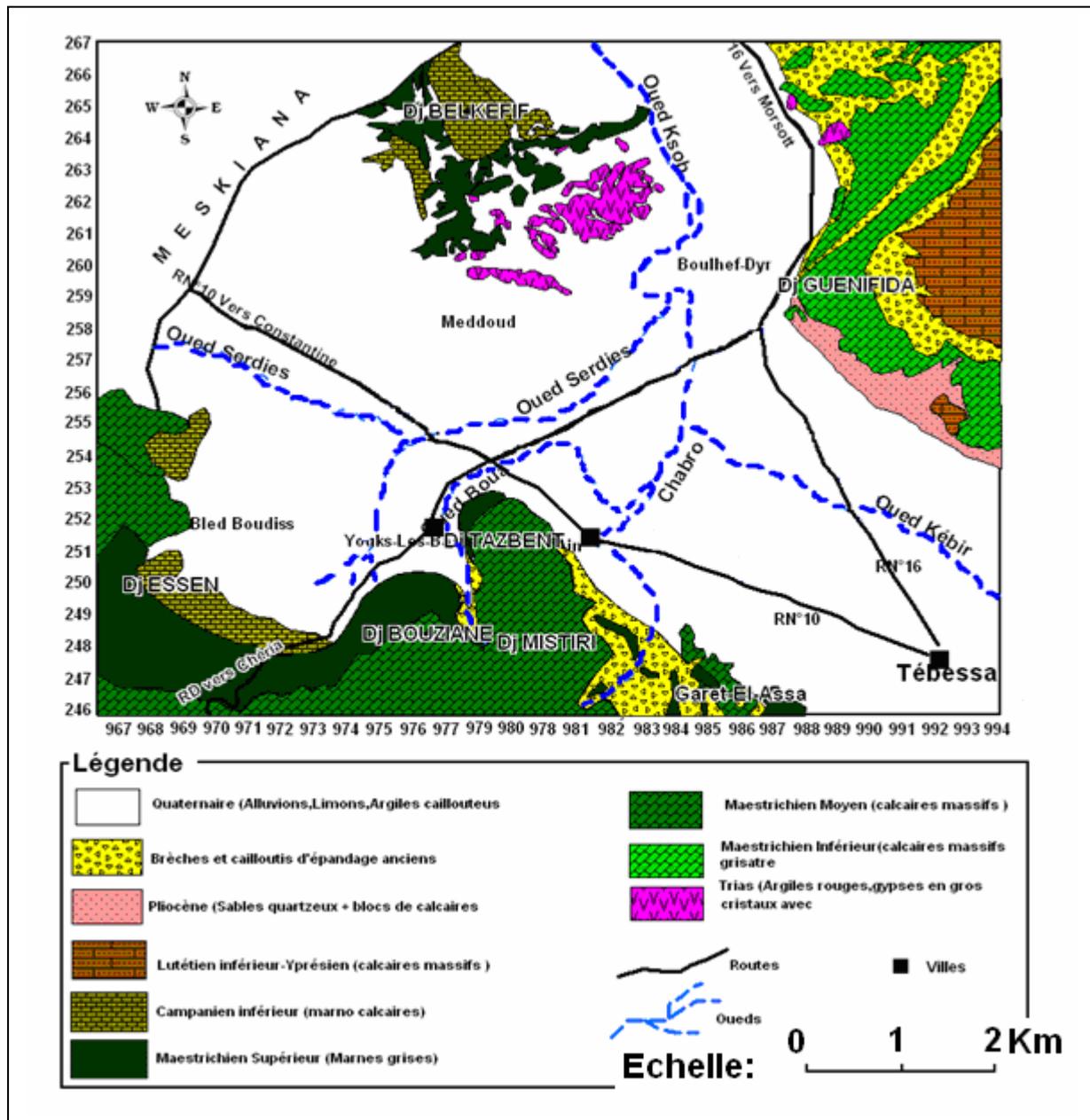


Figure 2 : Réseau hydrographique de la région d'étude [78,79,80,81]

3. Couverture végétale : La composition végétale de la zone d'étude est constituée de forêts, de maquis et de reboisement, le reste de surface se répartissant entre des terres agricoles et des terres improductives. Le développement de l'agriculture est fortement compromis par les caractéristiques du sol, des écoulements, et de l'intensité de l'action humaine. Les forêts de Hammamet sont essentiellement peuplées de pin d'Alep, une essence qui s'adapte le mieux aux conditions climatiques de la région, et n'exige pas beaucoup d'eau (200 mm/an) mais nécessite un sol à base de calcaire.

4. Géomorphologie

La région d'étude est marquée par les structures géomorphologiques suivantes :

4.1. Série montagneuse : étalée d'Est en Ouest sur une superficie considérable, avec des altitudes variant de 1000 à 1500 m comme Dj. Bouziane, Dj. Tazbent, Dj. Mistiri, Dj. Dokkane, Dj. Troubia ;
b- la chaîne Stah-Mistiri comprise entre le bassin de Tébessa et la vallée de Youks (plaine de Hammamet), composée de sommets d'altitude variant entre 1227 et 1278 m.

4.2. Plaines de dépression

4.1.1. Plaine de Serdiès C'est une vaste combe dégagée dans une puissante série marneuse Emschérienne, limitée par Dj. Troubia au Sud et par les crêtes rectilignes de Dj. Serdiès à l'Ouest.

4.1.2. Plaine de Hammamet Elle est installée sur un fossé d'effondrement subsident causé par la composante dextre de contrainte maximale plio- quaternaire qui est devenue le siège d'une sédimentation importante des formations d'âge quaternaires.

4.1.3. Plaine de Tébessa : rempli par des sédiments récents d'âge quaternaire, et composés généralement par des cailloutis de calcaires, marnes, argiles et sable fin et moyen.... La carte de remplissage quaternaire de la plaine Tébessa Hammamet montre bien que l'épaisseur de ces formations a atteint 550 m au centre de la plaine.

Chapitre II

Aperçu géologique

1. Introduction

La géologie est un moyen d'investigation très utile en hydrogéologie, car elle permet le repérage des formations susceptibles d'être aquifères, et de suivre leur évolution dans l'espace et dans le temps. En se basant aux anciens travaux géologiques régionaux de nombreux auteurs [1,18,24,29,47,65], le bassin étudié correspond à des formations autochtones constituée essentiellement de :

- très importantes assises carbonatées d'âge campanien ;
- divers recouvrement marquant le quaternaire.

Il faut signaler que la région de Hammamet n'a jamais fait l'objet de levés géologiques détaillés sauf sa partie Nord qui est couverte par la feuille de Meskiana n°204. Le seul travail connu remonte à l'époque coloniale avec la Carte Topographique de Hammamet n°205 (échelle 1/50000) que l'Institut de Géologie National a publié en 1950. On peut citer les références suivantes:

-G.Durozoy et G.Dubourdieu (1951) ont décrit le fossé d'effondrement de Tébessa et le fossé de Hammamet ;

-G. Durozoy (1956) a établi la stratigraphie de la région et a donné les premiers rapports descriptifs de la tectonique Plio-quaternaire ;

-W.M.Kowalski, A.R.Boudoukha, M.L.Hemila et André Pharizat (1997)[47], ont contribué à la reconnaissance du fossé d'effondrement de Tébessa dont l'objectif principal était de montrer les différents stades d'effondrements du graben de Tébessa (confins algéro-tunisiens) et la tectonique de la phase pliocène et plio- quaternaire.

L'étude lithologique et stratigraphique des faciès permet de donner plusieurs informations sur :

- ❖ La description des différents faciès et l'établissement d'une colonne stratigraphique synthétique des différentes strates ;
- ❖ La description des formations géologiques susceptibles d'être aquifères. Pour cela, on distingue :
 - Un milieu poreux, composé de sables et graviers qui correspondent généralement aux nappes d'eaux superficielles (nappes phréatiques) ;
 - Un milieu fracturé rencontré dans les formations carbonatées (d'âge Mæstrichtien et Turoniens) qui correspond aux nappes d'eaux profondes.

Généralement la zone d'étude est caractérisée par une stratigraphie allant du trias au quaternaire, comme on va le montrer dans les paragraphes suivants :

2. Stratigraphie : La description stratigraphique et lithologique de la région d'étude se présente de bas en haut comme suit (Fig.2) :

2.1. Secondaire

a- Trias : généralement, les formations de cet étage n'affleurent pas dans la zone d'étude ; mais existent probablement en grande profondeur, comme cela est prouvé par l'inclinaison remarquable des calcaires du Turonien de Dj. Es. Senn. Elles sont probablement poussées du côté oriental par le diapir triasique. Des roches gypseuses du Trias sont observables au côté sud de Dj. Belkfif et Bouhalala, ce Trias étant caractérisé par la présence des argiles rouges, des gypses fragmentés en gros cristaux avec des lentilles de calcaire et de dolomie. Dans la zone d'étude le trias affleure au Hammamet sud et Nord. Il affleure largement aux pieds de Dj.Belkfif à l'ouest d'un oued, puis encore plus à l'ouest à 400 m au Nord-Est de koudiat EL Alia. Tous ces affleurements sont assez réduits, le plus important étant celui situé à l'ouest de koudiat EL Gada. Il est allongé NE-SW sur 300m et 50m de large, et est constitué d'un ensemble de 30 à 40 m d'épaisseur surmonté de dolomies bréchiques en bancs sub-verticaux (F. Morel 1955. othmamime 1987) [1,12,24,29]

Les meilleurs affleurements se situent au sud des collines de koudiat EL Alia sidi Yahia, dans la plaine, qui semble correspondre au cœur de diapir Hammamet- Belkfif, dont l'extrémité SW se situerait à Youkous - les bains (un affleurement de trias est signalé aux environs de Youkous - les bains sur la carte géologique au 1/50000 Othmamine 1987)[65] Le trias est représenté par de grandes masses de gypses gris - bleuté et parfois rougeâtre, et par des argiles vertes et bariolées. Ce faciès, indique l'existence d'importantes lagunes où se sont déposées de grandes quantités de marnes, de gypse et probablement de sel (F. Morel. 1955, Buisson 1974) [1,12,24,29,65]

b- Crétacé inférieur et moyen

b-1- Aptien : Il est formé par des bancs de calcaires à Orbitolines, souvent bréchiques à ciment dolomitique ou calcique. Dans la partie méridionale du Dj. Belkfif, ces calcaires sont englobés dans le Trias diapirique, avec une épaisseur qui dépasse 100 m.

b-2- Albien : Il affleure près de Dj. Bouroumane où il est formé par des calcaires en bancs bruns épais sur une épaisseur de 90 m. Ces assises forment une grande partie des pentes moyennes du versant Ouest de Bouroumane. Cet étage ne se trouve pas dans la zone d'étude, peut être à cause du diapirisme accentué lors de cette période, cependant selon le dernier article de J-M.VILLA (2001) il existe près de Dj.Belkfif [56,65]

b-3- Vraconien : Il est bien développé dans la zone de Bouroumane et Hammamat, et il existe probablement en profondeur dans le fossé de Hammamet. Cet étage est caractérisé par un ensemble de calcaires et de marnes calcaires grisâtres en plaquettes, renfermant des empreintes d'Ammonites.

C. Crétacé Supérieur

C-1- Cénomaniens : Il affleure dans la partie Nord- ouest du fossé de Hammamet à l'Est de Dj.Essen, sous la forme de marnes bleues violettes à intercalation de lumachelles. Ces marnes sont connues aussi au sud de Dj. Belkfif dans l'anticlinal de Haméimat et dans la zone orientale du Dj.Ozmor (Tella)

C-2- Turonien : Il se subdivise en deux parties, le turonien inférieur et le turonien supérieur. La base du Turonien inférieur est représentée par des marnes calcaires grisâtres, dont l'épaisseur est de l'ordre de 60 m. Le sommet du Turonien inférieur est représentée par des calcaires beiges qui constituent les falaises du Dj.Essen ; Dj.Belkfif, kef Daheche, Dj. Tella (chaîne d'Ozmor). Le Turonien supérieur se présente en marnes grises, alternées avec des marnes vertes d'une épaisseur d'environ 150 m.

C.3- Emschérien (Santonien et Coniacien) : C'est une série épaisse et monotone de marnes grises ou vertes, contenant dans sa partie supérieure des niveaux de calcaires lumachelles sur une épaisseur de 250 m.

C-4- Campanien : Le Campanien (inférieur et supérieur) est caractérisé par une série des marnes grises ayant une épaisseur de 200 m. Le Campanien moyen présente dans le relief une nouvelle corniche entre celle du Turonien et du Maestrichtien, il passe sensiblement aux formations marneuses qui font le passage entre Campanien supérieur et Maestrichtien inférieur (Fig.1)

C-5- Maestrichtien : Le Maestrichtien inférieur est représenté par des éboulis au pied des reliefs. Le Maestrichtien supérieur est une formation puissante de calcaires massifs blancs bien lités renfermant de nombreuses empreintes d'Inocérames. Leur épaisseur est de l'ordre de 80 à 100 m, mais atteint 200 m au sud-Ouest de Youkous (Hammamet).

2.2. Tertiaire

a- Pliocène inférieur

a-1- Paléogène : (Dano-Montien et Tanétien) : Il se caractérise par une formation marneuse couverte au sommet par des marno-calcaires, renfermant plusieurs couches phosphatées sur une épaisseur de 10 à 15 m.

b- Paléogène supérieur

b-1- Éocène : Il est caractérisé par des formations calcaires très épaisses à rognons de silex et de boules de lumachelles. Il affleure dans les parties Nord-ouest (Gourigneur) et au sud-Est de Hammamet (Tazbent). De l'autre côté du fossé de Tébessa il apparaît à Dj. Dyr-Gastel.

c- Néogène

c-1- Miocène : Il n'affleure ni dans la région d'étude (Hammamet), ni dans ses environs les plus proches.

d- Néogène supérieur

d-1- Pliocène : Il est composé par des argiles et des conglomérats, et il affleure près de Dj. Belfkif, et dans la partie orientale du fossé de Morsott, ainsi que dans la partie orientale du fossé de Hammamet au sud de l'embranchement de la route vers Bir d'Heb.

2.3. Quaternaire

Il est représenté par le remplissage du fossé de Hammamet et de Tébessa, et occupe une surface importante principalement dans les plaines et aux pieds des montagnes. Il s'agit de :

- 1- **villa franchien supérieur (pléistocène inférieur)**, qui se caractérise par des galets ;
- 2- **pléistocène moyen**, représenté par des argiles sableuses ;
- 3- **pléistocène supérieur**, formé par des galets et des graviers ;
- 4- **holocène**, composé essentiellement par des matériaux visibles dans les vallées de Youkous ;
- 5- **éboulis actuels**, qui se trouvent aux pieds des reliefs calcaires avec un épandage important. Ces dépôts sont, en majeure partie, déposés sur les séries marneuses du Crétacé supérieur.

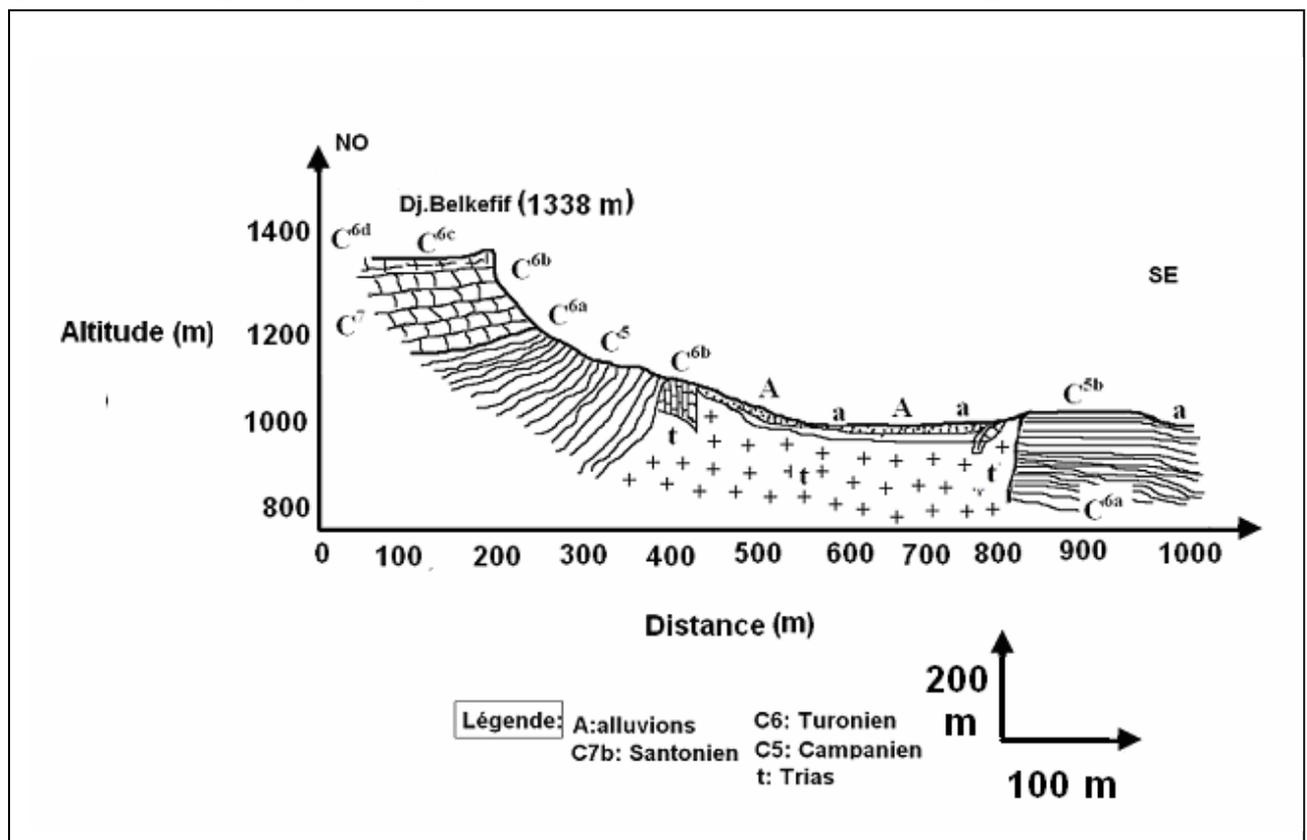


Figure 1 : Coupe géologique schématique au pied de Belkif.

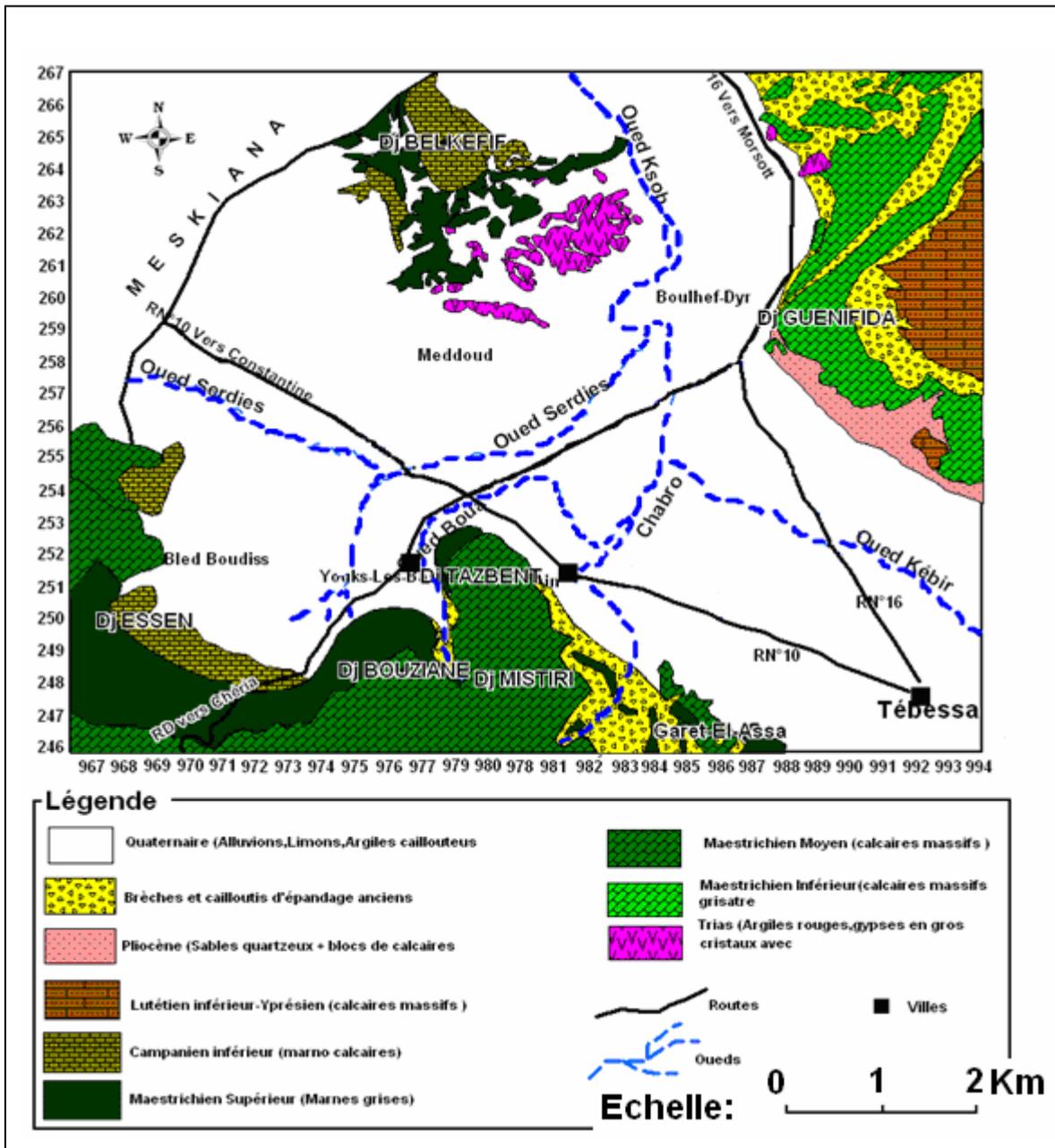


Figure 2 : Carte Géologique de la région d'étude [carte dressée par MM. P.Deleau et R.Laffitte, publiée en 1951] [78,79,80,81]

Tableau 1 : Colonne stratigraphique de la région d'étude [d'après G.Durozoy et F.Morel, 1956][1,18]

EPS	ERE	Syst per	Sous Syst époque	Etages	Symbole	Coupe	Faciès et fossiles	
150	QUATERNAIRE				q		Limons, argiles, galets, cailloutis, et éboulis actuels.	
250	TERTIAIRE	NEOGENE	MIOC-ENE	Plio-villa franchien	Pg		Dépôts argilo-gonclomératiques	
250				Tortonien	m		Faciès littoraux, sables quartzeux avec une grande abondance de grain de glauconie, faciès continental, Sables quartzeux.	
								Serravallien
								Langhien
				Burdigalien				
200		PALEOGENE	EOC-ENE	Lutétien	E		Calcaire Calcaire à silex.	
				Yprésien				
100			PALEOCENE	Thanitien	P		Marno-calcaire et phosphate Marnes.	
								Danien
200		SECONDAIRE	CRETACE	Supérieur SENONIEN	Maestrich-tien	C ₉		Calcaire en banc blanchâtre renferme des « <i>Inocerames</i> » Marne grisâtre
200	Campan-ien				C ₈		Marne grise à intercalation de bancs de calcaires blanc crayeux avec des nombreux filons du calcite dans la partie inférieure.	
250	Emschér-ien				C ₇		Marne avec intercalation des bancs lumachelliques.	
150	Inférieur			Turonien Supérieur	C _{6b}		Calcaires massifs beiges, par fois roses localement dalomités.	
100				Turonien Inférieur	C _{6a}		Marno-calcaire gris à patine rousse (100m), ensuite calcaire marneux à « <i>Inocérames</i> » allongé à test noir.	
100				Cénomani-en	C ₅		Marnes grises très fossilifères. Marnes à filons de calcite et à intercalation de minces lits de calcaires très dures.	
90				Albien	C ₂		Bancs de calcaires, bruns, épais	
100				Aptien	C ₁		Gros bancs de calcaires souvent bréchiques à « <i>Orbitolines</i> » et rudistes.	
	TRIAS			TRIAS		t		Argiles rouges, marnes gypsifères.

Fig :02 Colonne stratigraphique : d'après G. Durozoy, F. Morel.

3. Tectonique : Les différentes phases tectoniques, ayant affecté l'Atlas Saharien oriental, ont engendré dans l'ensemble des zones atlasiques le percement du matériel triasique (diapirisme), les plissements des séries sédimentaires et la formation des fossés d'effondrement. Ces phases diffèrent

d'une époque à une autre, en style et en direction. Les plus importantes sont détaillées dans ce qui suit [1,12,24,29,56,65] :

3.1. Plissements : La région frontalière Algéro-Tunisienne est caractérisée par des plis à grands rayons de courbures dont l'ossature est formée par des calcaires du crétacé. Les anticlinaux substitués par des vastes structures synclinales sont souvent percés dans leurs charnières par du trias diapir, leur orientation est NE- SW, les plus importants sont: l'Ouenza, Boudjaber, Def, Mesloula, Belkfif qui forment les anticlinaux, pour les synclinaux on distingue oued El Ksob, Aichemia, Haoud s'ghir.

Ces plis (anticlinaux, synclinaux), résultent des compressions Néogène dont la phase majeure a été considérée comme étant comprise entre l'éocène et le miocène, en raison de l'existence d'une discordance entre le miocène et les sédiments du crétacé et de l'éocène (G. Dubourdion 1956, G. Dubourdion et G. durozoy 1950, B les et Fleury 1969, J.M .Villa 1980). Morel (1955) a signalé, dans les environs de djebel Belkfif, deux directions de plis plus récents que ceux de la phase finie.

Il existe deux phases de plissements post- miocène dans les environs de Tébessa :

- les plissements du pliocène inférieur contemporains de l'effondrement du fossé de Morsott (contrainte maximale N20°E, direction des plis N90-135°E) ;
- les plissements du villafranchien, contemporains de l'effondrement du fossé de Tébessa (contrainte maximale N80°E, direction des plis N160-170°E°).

Le fossé d'Hammamet a le même âge que celui de Tébessa, mais il est plus récent que celui de Morsott. Le substratum des fossés de Tébessa et d'Hammamet est constitué d'une mosaïque de horst et de grabens.

3.2. Failles : Les fracturations qui ont enregistré dans les couches de Maestrichtien sont des diaclases et se répartissent clairement en deux directions, la première est de N110°E recoupée par la deuxième direction qui est N20°E. Le substratum de ce fossé basculé est constitué d'un système de horsts et de grabens orientés SW-NE, donc la fracturation ancienne ne semble pas jouer un rôle orographique important dans le paysage ; en revanche, elle a exercé une grande influence sur l'érosion.

Depuis l'éocène, ce sont ces failles qui ont accompagné les plissements facilitant ainsi les écrasements des charnières anticlinales. La Tectonique post-miocène a, par contre, joué un rôle orographique très important dans la région, et c'est à cette phase qu'on attribue les grandes failles qui présentent des rejets importants à orientation NW-SE orthogonalement aux structures atlasiques de type jurassiens. Celles-ci ont défini de nombreux fossés d'effondrement dans la région (Hammamet- Morsott-Tébessa)

3.3. Fossés d'effondrements : La réactivation d'anciens accidents au cours de la phase tectonique distensive a donné naissance à des fossés d'effondrements orientés NW-SE à E-W (G. Dubourdiou 1956, Smati 1986, Bouzenoune 1993)[56,65] qui se sont manifestés après les grands plissements post-miocène (G. dubordiou et G.durozoy 1950). Selon Othmanine (1987) et Bonzenoune (1993), le graben de Tébessa - Morsotte s'est ouvert par de petites failles orientées N140- 160°E à la suite d'une phase tectonique distensive NE- SW postérieure pour Bismuth (1973), Chikhi (1984), et Benayed *et al* (1990).

Ces premières manifestations d'effondrements et les grabens ont commencé au cours de la distension crétacé et l'effondrement majeur a eu lieu durant le miocène (aquitanien- toronien), comme de montre la (Fig.3)

3.4. Diapirisme : L'atlas saharien oriental est marqué par de nombreux pointements de masses d'évaporites triasiques affleurant sur une bande de 80 km et ayant une direction NE-SW. Ils sont considérés comme des diapirs ayant percé leur couverture à différentes étapes de leur évolution (G. Dubourdion 1956, Thibieroz et Madre 1976, Bonzenoune 1993, Harkati 1992, Busson 1974)[56,65]. Un Diapirisme précoce s'est produit à l'Aptien et à l'Albien dans les monts de Mellègues et semble intervenir dans un contexte de mobilité tectonique particulier. Les indices de cette activité qui ont été enregistrées dans la sédimentation permettent d'identifier les différentes phases de percement diapiriques. On distingue :

- La phase Cénomaniens à Dj.Lorbeus (Perthuiset 1978), au Dj.Chambi(Chikhi et al 1984) et envisagé au Dj.Belkif (Othmanine 1987) ;
- La phase Crétacé supérieur à Fedj El Adoum dans le sillon Tunisien (Laatar 1980) et à Khenchela (Camoin et al 1990) ;
- La phase Luticien supérieur à Dj.Echcheid (Tunisie septentrionale) (Perthuisot, 1972) ;
- La phase Miocène à l'Onenza et à BouKhadra (G. Dubourdion 1956)[65].

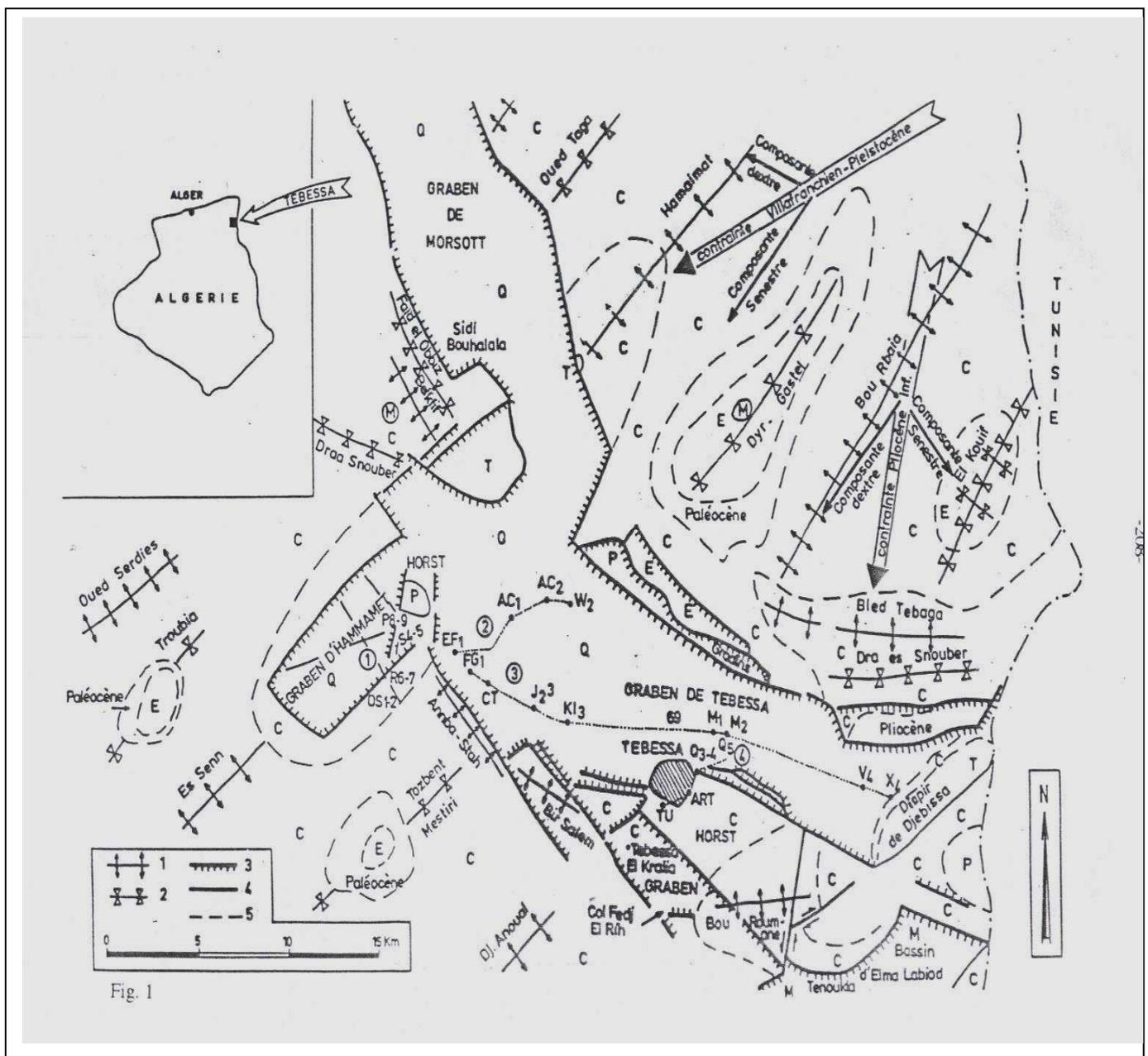


Fig. 1

Figure 3 : Esquisse tectonique des environs de Tébessa, [W.M.Kowalski, A.R.Boudoukha, M.L.Hemila et André Pharissat, 1997][47]

(T :Trias,C :Crétacé,E :Éocène,M :Miocène,P :Pliocène,Q :Quaternaire, OS1, EF1 : symboles des forages,1-4 :numéros des profils,1 :anticlinal,2 :synclinal,3 :marges de graben,4 :failles)

4. Conclusion

La région d'étude fait partie du bassin d'effondrement de la plaine de Tébessa-Morsott-Hammamet, qui est comblée par des sédiments d'origine continentale, formés essentiellement d'alluvions anciennes et récentes, d'argiles, de grès, de cailloutis de calcaires. La dominance de ces formations a donné une bonne perméabilité au sol. Cela est confirmé par les logs stratigraphiques des forages réalisés dans la zone d'étude. Ce bassin d'effondrement est entouré par des reliefs importants. Ceux-ci sont formés d'un ensemble de synclinaux à faciès prédominants de calcaires et de calcaires marneux qui s'étalent du Trias jusqu'au Maestrichtien. Cette série plissés, exposées à l'érosion à partir de l'oligocène et recouverte par le miocène ; l'ensemble du Crétacé et du Miocène érodé, est recouverte uniquement par le plio- quaternaire, et présente des plis et des failles au niveau de ces formations. L'interférence de deux types de tectonique cassante a beaucoup contribué à la réalisation du schéma structural. En effet, ces rides d'orientation SW-NE, sont associées à l'érosion dominante et à une tectonique cassante importante, ont joué un rôle très important dans la formation des systèmes hydrogéologiques les plus stratégiques de la région d'étude.

Chapitre III

Étude climatologique

1. Introduction

L'étude climatologique est très importante pour la connaissance des caractéristiques hydro climatologiques, qui est indispensable pour évaluer l'alimentation des ressources hydriques et des réserves souterraines. En effet, une grande partie de l'alimentation des réserves se fait par la remarquable contribution des précipitations, ou plus précisément les précipitations efficaces (PE), qui dépendent de plusieurs facteurs climatiques et hydrologiques. L'estimation des caractéristiques climatiques d'un bassin versant joue un rôle important dans la connaissance du comportement hydrologique des cours d'eau. Les paramètres les plus intéressants dans l'identification du régime d'écoulement sont les précipitations (P) et la température (T).

Ces paramètres conditionnent soit la sécheresse, soit l'humidification du milieu. Elles sont utilisées d'une part, pour estimer les différents paramètres du bilan hydrique et d'autre part, pour la connaissance des conditions d'alimentation des réserves en eaux souterraines (IE).

Comme la région d'étude est comprise entre deux régions bien définies et bien contrôlées par les agents de l'A.N.R.H. (Agence Nationale des Ressources Hydriques, W.Tébessa) ainsi que par la station météorologique à Tébessa, notre étude sera basée sur des données recueillies au niveau des deux stations citées ci dessous (Annexe 1). Le tableau1 présente les coordonnées Lambert des deux stations climatiques utilisées :

Tableau 1. : Les coordonnées Lambert des stations de mesures [ANRH, Tébessa]

Station	X(km)	Y(Km)	Z (m)	Période d'observation	Code de la station
Tébessa	991.9	247.2	890	1983/84-2004/2005	120301
Hammamet	977.9	248.5	860	1983/84-2004/2005	120304

1.1. Continentalité pluviale moyenne

La continentalité pluviale permet de définir le type de climat continental. Elle s'exprime par le rapport (**R**) de la somme des coefficients pluviométriques relatifs mensuels des mois les plus chauds et la somme des mois les plus froids. On a alors la classification suivante :

si : $1 < R < 1.75$ climat semi – continental

$R < 1$ climat non continental

A partir des courbes ombrothermiques établies (Fig.5,6),on peut constater que l'année est divisée en deux grandes saisons :

- la saison chaude qui va de mai à novembre (7 mois)
- la saison froide qui s'étale de décembre à avril (5 mois)

1.2. Calcul des coefficients pluviométriques ⁽²⁾

$$C_p = 365 P_i / P_n \quad (1)$$

Avec :

P : Précipitation moyenne annuelle ;

P_i : Précipitation du mois de rang i ;

n : Nombre de jours dans le mois ;

C_p : exprime le caractère plus au moins pluvial du mois considéré par rapport à l'ensemble de l'année.

$$C_p = 365 / n_i \cdot P_i / P = k \cdot P_i / P \quad (2)$$

Où **k** est un coefficient dépendant du nombre de jours du mois considéré :

$$\text{Si } n_i = 31 \text{ jours} \rightarrow k = 365/31 = 11.77$$

$$\text{Si } n_i = 30 \text{ jours} \rightarrow k = 365 / 30 = 12.16$$

Sur quatre années consécutives, le mois de février comporte 28 jours pendant trois ans, et une fois 29 jours, d'où :

$$K = 365 / (28 \times 3 + 29)^{1/4} = 12.92 \quad (3)$$

- Pour la station de Hammamet on a $P = 297.79 \text{ mm}$

- Pour la station de Tébessa on a $P = 339.14 \text{ mm}$

Tableau. 2: Coefficient pluviométrique de la région de Hammamet

Mois	Saison humide					Saison sèche						
	Dec	Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Jui	Juill	Aout	Sep	Oct	Nov
K	11.77	11.77	12.92	11.77	12.16	11.77	12.16	11.77	11.77	12.16	11.77	12.16
Pi	25.68	28.58	15.85	31.78	23.02	39.1	23.32	10.05	15.96	26.58	30.78	26.68
Cp	1.04	1.13	0.68	1.25	0.94	1.54	0.95	0.39	0.63	1.08	1.21	1.09

- saison humide : $C_p = (sh) = 5.04$

- saison sèche : $C_p = (ss) = 6.89$

Pour la région de Hammamet : $R = C_p Ss / C_p Sh = 6.89 / 5.04 = 1.36 \quad (4)$

Donc $1 < R < 1.75$ Climat semi aride (semi continental)

Tableau. 3: Coefficient pluviométrique de la région de Tébessa

Mois	Saison humide					Saison sèche						
	Dec	Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Jui	Juill	Aout	Sep	Oct	Nov
K	11.77	11.77	12.92	11.77	12.16	11.77	12.16	11.77	11.77	12.16	11.77	12.16
Pi	21.63	29.99	17.55	34.19	25.82	35.45	32.9	14.85	33.19	27.67	37.84	21.63
Cp	0.75	1.04	0.66	1.18	0.92	1.23	1.17	0.51	1.15	0.99	1.31	0.77

- saison humide : $C_p = (sh) = 4.55$

- saison sèche : $C_p = (ss) = 7.13$

Pour la région de Tébessa : $R = C_p Ss / C_p sh = 7.13 / 4.55 = 1.56 \quad (5)$

Donc $1 < R < 1.75$ le climat est semi continental (semi aride)

1.2. L'indice d'aridité de Martonne : Cet indice prend en considération les précipitations et les températures annuelles :

$$I = p / T + 10 \quad (6)$$

Avec :

I : Indice d'aridité ;

P : Précipitation moyenne annuelle (mm) ;

T : Température moyenne annuelle (C°)

Application numérique :

* pour la région de Hammamet : $p = 297.79 \text{ mm}$, $T = 15.91 \rightarrow$ ce qui donne $I = 11.49$

* pour la région de Tébessa : $p = 339.14 \text{ mm}$, $T = 15.91 \rightarrow$ ce qui donne $I = 13.08$

Suivant les valeurs de **I** obtenues par Martonne (1923), on a établi la classification suivante :

- $I < 5$ = climat hyper aride
- $5 < I < 7.5$ = climat désertique
- $7.5 < I < 10$ = climat steppique
- $10 < I < 20$ = climat semi aride
- $20 < I < 30$ = climat tempéré

Pour la région de Hammamet $I = 11.51$ et pour la région de Tébessa $I = 12.74$. Ces régions sont donc soumises à un climat semi - aride.

2. Étude des paramètres climatiques

2.1. Étude des précipitations : Selon les données relatives aux stations de Tébessa et de Hammamet (Annexe1) pour une durée d'observation de 21 ans (1983/1984-2004/2005), nous avons pu établir les graphiques (Figure1-4) des variations interannuelles, sur lesquels nous avons constaté que:

- L'irrégularité pluviométrique d'une année à l'autre est mise en évidence avec des écarts à la normale considérables ;
- Le cycle pluviométrique le plus arrosé correspond à l'année 2002-2003 avec un apport de 516.4 mm pour la station de Tébessa, et à l'année 2003-2004 avec un apport de 610.8 mm pour la station de Hammamet ;
- Au niveau de la station de Tébessa, le cycle le plus sec correspond à l'année 1983/1984 avec un apport de 129.2 mm et pour la station de Hammamet il correspond à l'année 1996/1997 avec un apport de 163.4 mm ;
- le régime pluviométrique interannuel et mensuel est très irrégulier avec un écart très important entre les années et les mois, respectivement ;
- la moyenne interannuelle de pluie est égale respectivement à 330.16 mm à Tébessa et à 298.31 mm à Hammamet, et la moyenne mensuelle est de l'ordre de 27.51 mm à Tébessa et 24.86 mm à Hammamet ;
- les mois les plus arrosés sont les mois de mars, avril, mai et juin, avec une valeur moyenne mensuelle maximum égale à 37.04 mm à Tébessa et à 40.93 mm à Hammamet au mois de mai ;
- le mois le plus sec est celui de juillet avec une valeur minimale moyenne mensuelle égale à 15.50 mm à Tébessa et à 10.41 mm à Hammamet.

Tableau 4 : Variation de précipitation moyenne mensuelle de la station de Hammamet (1983/1984-2004/2005)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv.	Fève	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill.	Août
Pmoy. mens. (mm)	27.09	26.58	30.78	25.68	28.58	15.85	31.78	23.02	39.1	23.32	10.05	15.96

Tableau 5. Variation de précipitation moyenne mensuelle de la station de Tébessa (1983/1984-2004/2005)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Jui	Juill	Aout
Pmoy. mens. (mm)	28.04	27.67	37.84	21.63	29.99	17.57	34.19	25.82	37.04	32.9	15.50	33.19

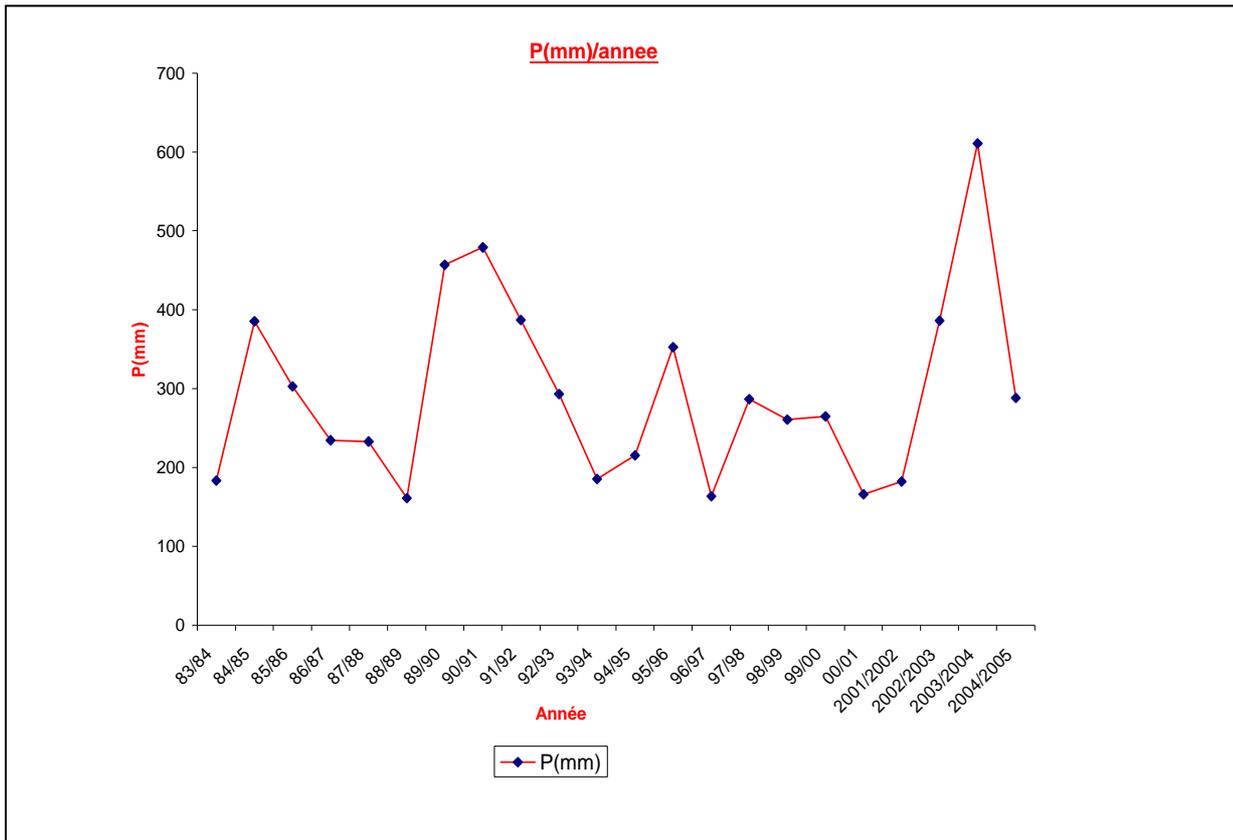


Figure 1 : Précipitations interannuelles de la région de Hammamet sur une période de 22 ans (1983/1984 - 2004/2005)

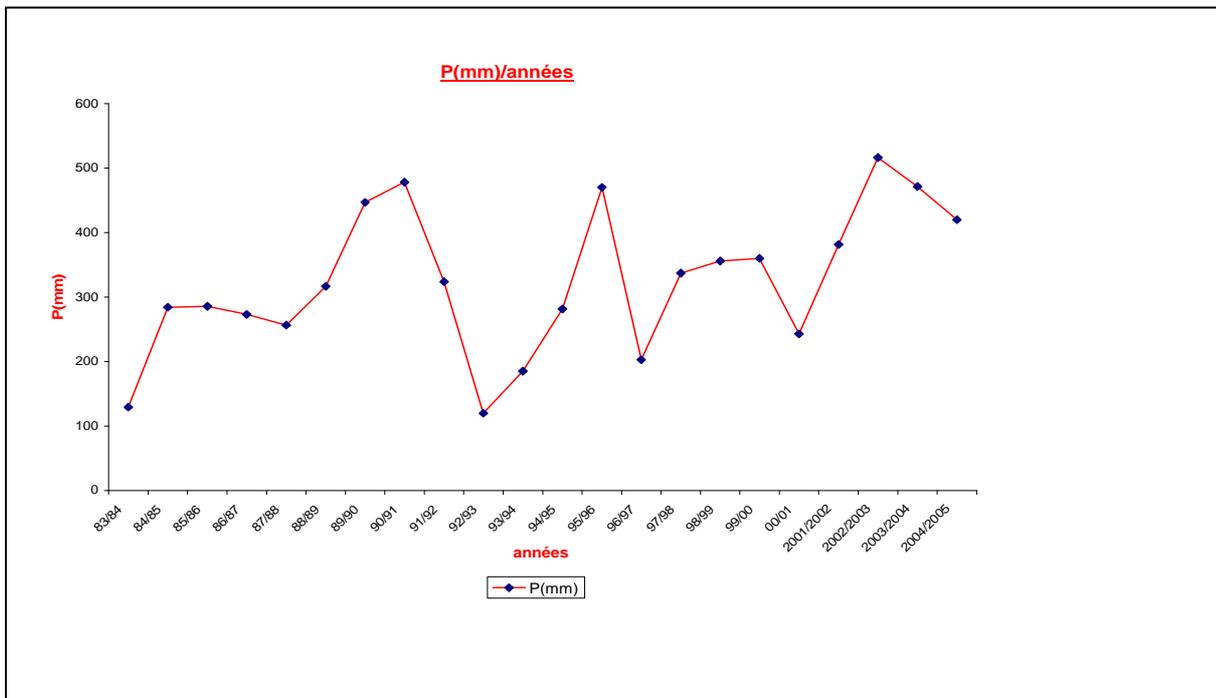


Figure 2 : Précipitations interannuelles de la région de Tébessa sur une période de 22 ans (1983/1984 - 2004/2005)

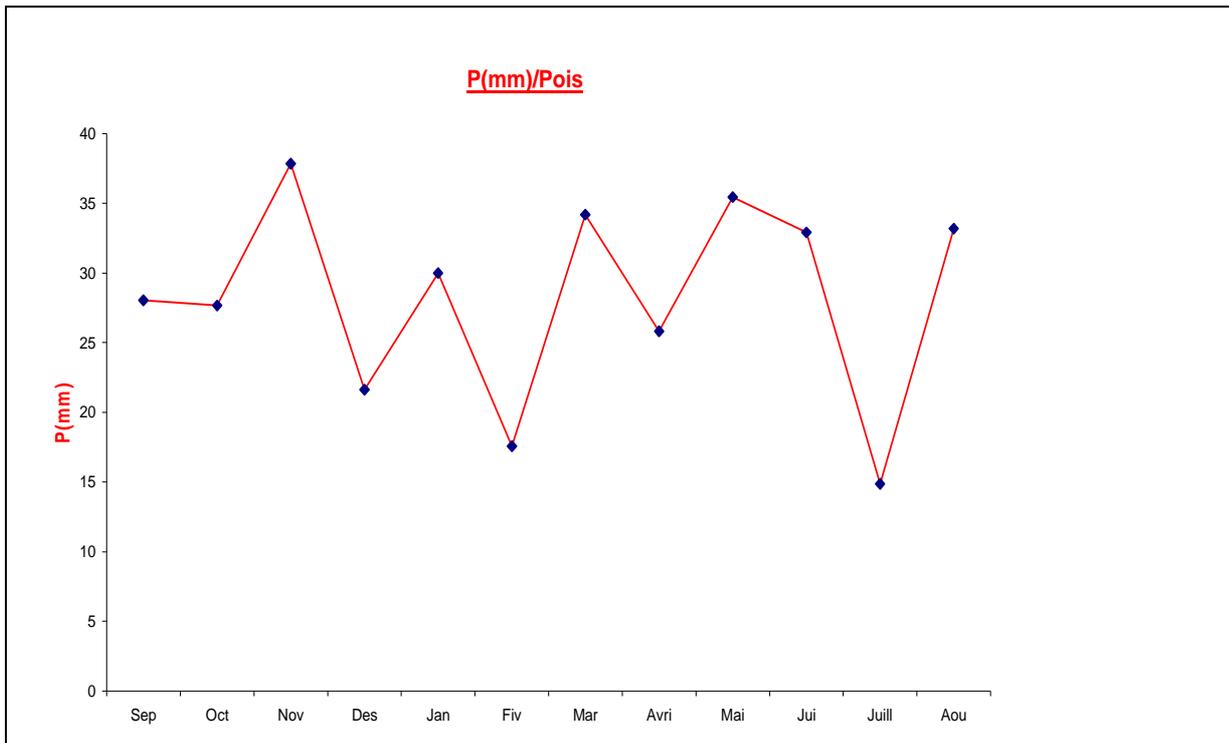


Figure 3: Variation des précipitations moyennes mensuelles de la région de Hammamet sur une période de 22 ans (1983/1984 - 2004/2005)

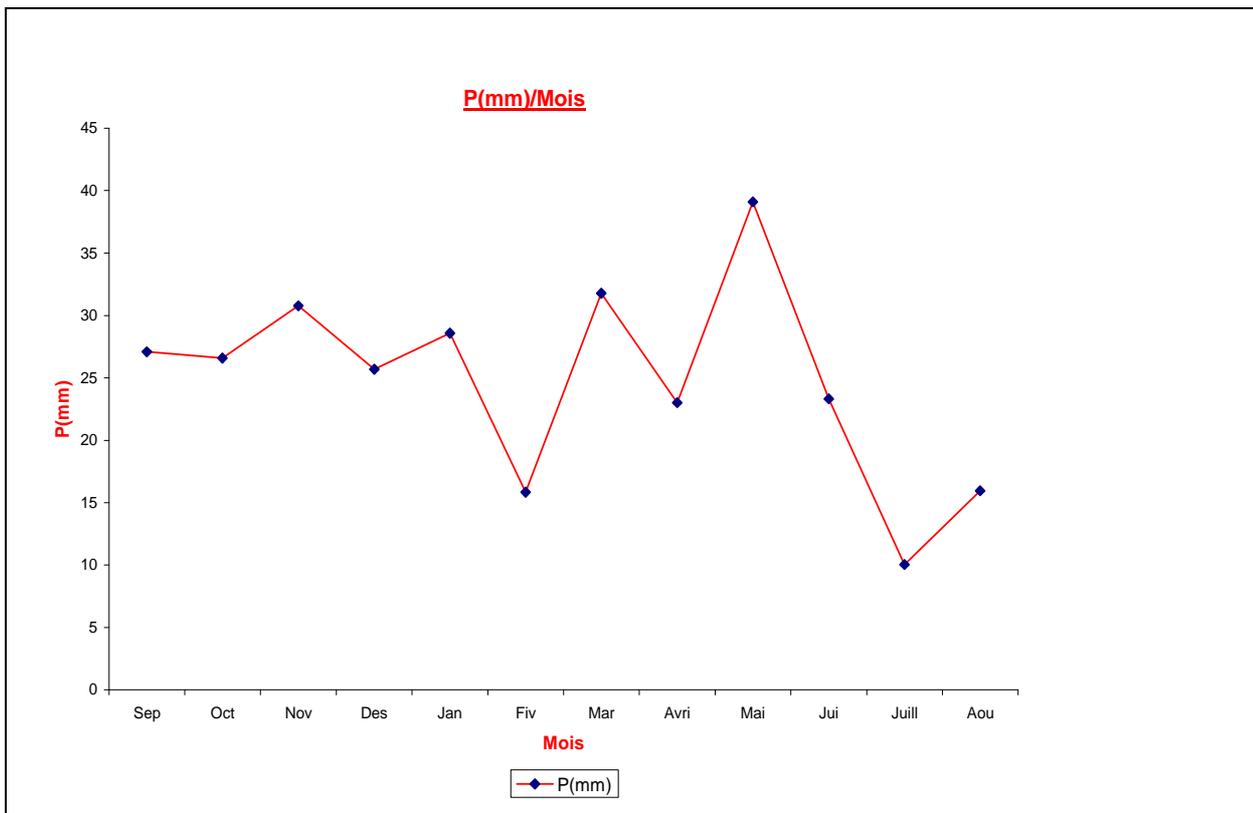


Figure 4: Variation des précipitations moyennes mensuelles de la région de Tébessa sur une période de 22 ans (1983/1984 - 2004/2005)

2.2. Étude de la Température : La température est un facteur très important, régissant le phénomène d'évapotranspiration et le déficit d'écoulement annuel et saisonnier. Les données sur la température dont on dispose sont des valeurs moyennes mensuelles et annuelles mesurées à la station Météorologique de Tébessa.

2.2.1. Températures moyennes mensuelles : D'après le tableau des températures et l'histogramme, on a constaté que le mois de janvier est le mois le plus froid de l'année tandis que les mois les plus chauds sont juillet et août.

Tableau. 6 : Variation des températures moyennes mensuelles (1983/1984-2003/2004)

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Dec.	Janv.	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août
TC°	22.77	16.64	11.85	7.66	7.08	7.63	10.09	13.26	18.42	23.26	26.62	26.93

2.3. Diagrammes ombrothermiques : C'est la confrontation des précipitations avec la température de même période d'observation. L'établissement de ce diagramme pour les deux régions (Tébessa et Hammamet) a permis de montrer que la période de sécheresse qui s'étend sur 7 mois de l'année, allant du mois de mai au mois de Novembre, alors que le reste des mois (5 mois) représente la période humide allant du mois du Décembre au mois d'avril (Fig.5,6)

Tableau 7: Données du diagramme ombrothermique pendant une période de 22 ans 1983/84-03/04 de la station de Hammamet

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv.	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août
P(mm)	27.09	26.58	30.78	25.68	28.58	15.85	31.78	23.02	39.10	23.32	10.05	15.96
T (°C)	22.77	16.64	11.85	7.66	7.08	7.63	10.09	13.26	18.42	23.36	26.62	26.93

Tableau 8_Données du diagramme ombrothermique pendant une période de 22 ans « 83/84-04/05 » de la station de Tébessa

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv.	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août
P(mm)	28.04	27.67	37.84	21.63	29.99	17.57	34.19	25.82	35.45	32.9	14.85	33.19
T(°C)	22.77	16.64	11.85	7.66	7.08	7.63	10.09	13.26	18.42	23.36	26.62	26.93

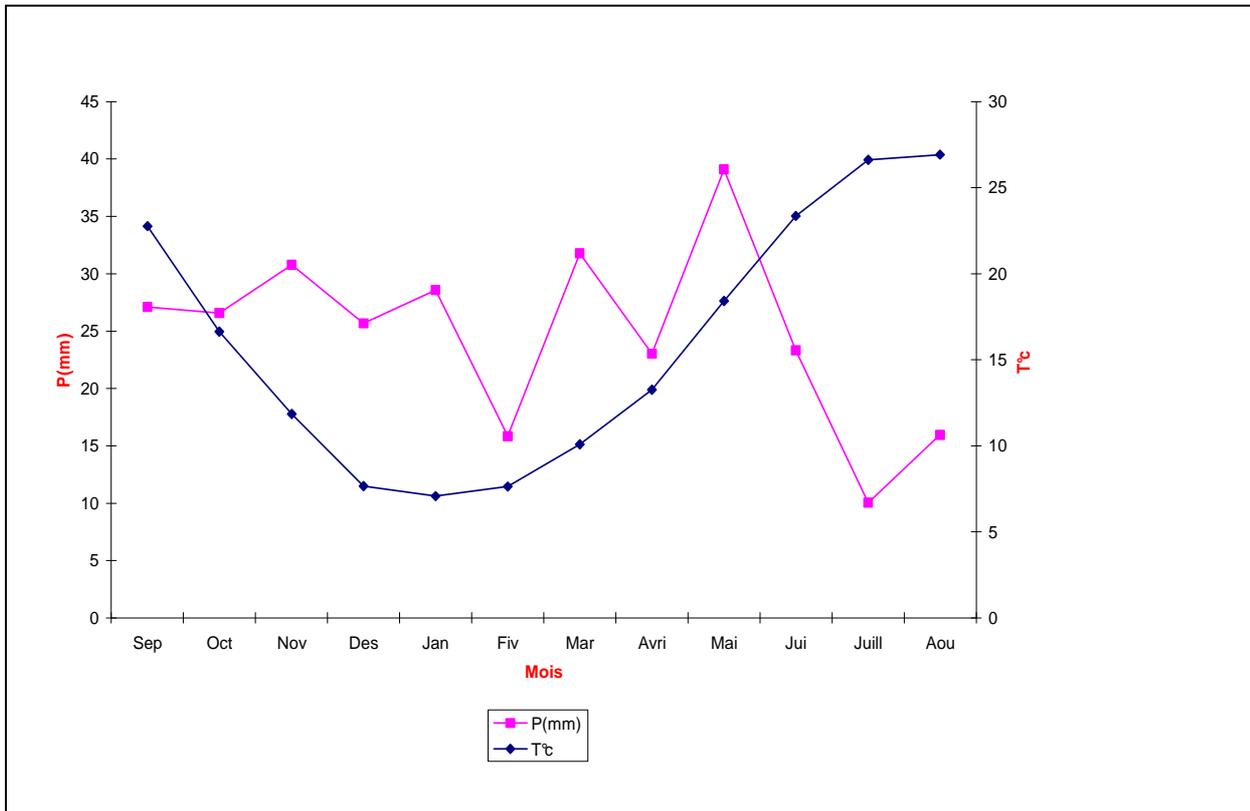


Figure 5 : Courbe ombrothermique de la région de Hammamet (1984/2005)

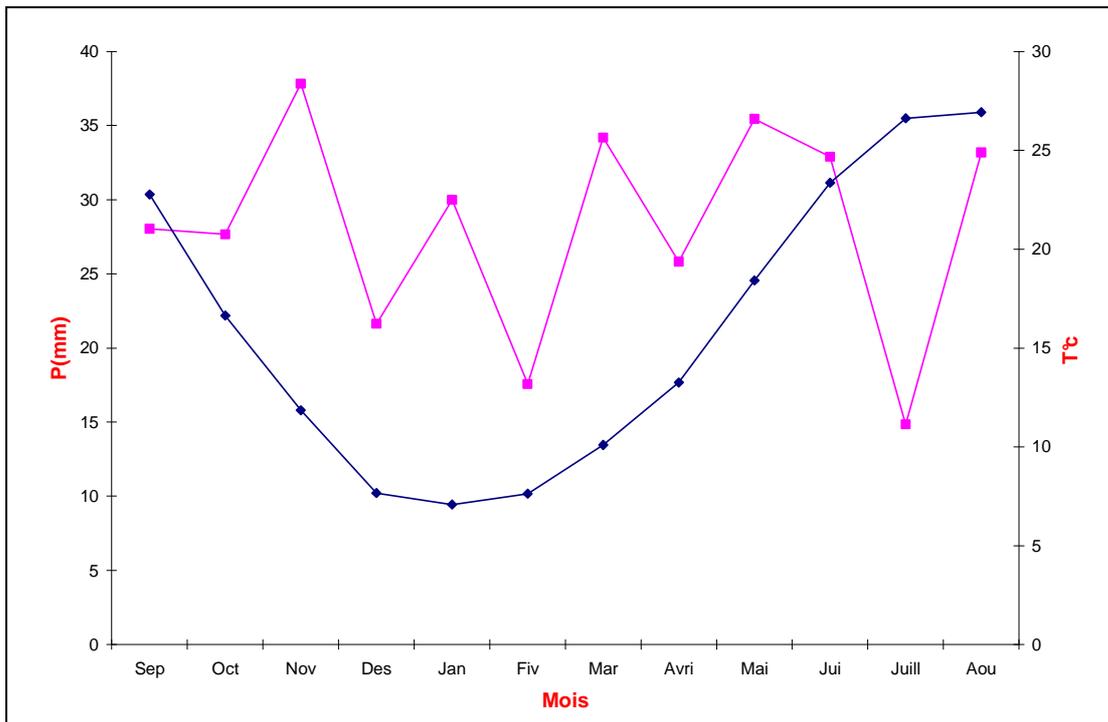


Figure 6 : Courbe ombrothermique de la région de Tébessa (1984/2004)

2. 4. L'humidité : L'humidité relative représente la proportion d'eau présente dans l'air. En considérant que les conditions climatiques sont semblable entre la région de Tébessa ville et de Hammamet, il a été pris en considération les 21 ans de mesure (83/84- 03/04), le mois de Mai étant le mois le plus humide (37.04 mm) avec une humidité relative égale à 70.1% et le mois le plus sec étant le mois de juillet avec une humidité relative de 39%.

2.5. Le vent : Les vents sont caractérisés par leur vitesse et leur intensité. Les vents prédominants sont de direction ouest-nord-ouest au mois de Novembre et la distribution du champ de direction du vent est saisonnière hiver-été. En hiver, les vents du NW sont souvent secs et froids ; en été les vents du sud sont fréquents et peuvent être chauds et secs, d'où l'augmentation de l'évaporation et une sécheresse fait augmenter le déficit d'écoulement.

2.6. L'insolation : L'insolation représente la quantité de rayonnement solaire retenu et absorbé par la terre. Le mois le plus ensoleillé est juillet avec 11.1 heures/jour et le mois le moins ensoleillé est janvier avec une valeur de 5.3 heures/jour.

2.7. L'évaporation : Le mois de juillet est le mois où l'évaporation est la plus intense avec une moyenne mensuelle de 12.0 mm. Par contre le mois de janvier est le mois où l'évaporation est minimale avec une moyenne mensuelle de 3.1 mm.

2.8. Nébulosité :

- Le mois le plus nuageux est février avec 4.4 octa

- Le mois le moins nuageux est juillet avec 1.4 octa

2.9. La neige : D'après Seltzer (1946), la région d'étude est située dans une zone d'enneigement moyen de 5 à 10 jours par an.

2.10. Les crues : D'après les renseignements de certains habitants de la ville de Hammamet, les fortes crues sont fréquentes dans la zone d'étude. Lors de ces crues, l'oued Bouakous déborde par dessus de ses berges et un écoulement de débordement se forme (terres basses). L'intérêt économique de la prédétermination du débit maximum probable des crues d'un oued est évident, en raison de la nécessité de calculer certains ouvrages d'art. Leurs caractéristiques sont, en effet, essentiellement déterminées par le maximum probable de la crue à laquelle ces ouvrages devront faire face.

3. Bilan hydrique : Le bilan hydrique est un moyen de contrôle de la cohérence des données évaluées de manière indépendante. Le bilan hydrique exprime donc le processus que peut suivre une quantité d'eau arrivant au sol par précipitation avant de retourner à l'atmosphère. il permet le calcul de la répartition des précipitations reçues par la surface, selon deux phénomènes [1,15,19] :

E = l'évaporation ; **R** = le ruissellement ; **RFU** = la quantité d'eau stockée dans le sol (réserve facilement utilisable)

3.1. Evapotranspiration Potentielle (ETP)

a /Définition : L'évapotranspiration peut être considérée comme étant la somme des deux termes que sont la transpiration végétale et l'évaporation du sol. L'intensité de l'évapotranspiration est fonction de la radiation solaire, de la température, de l'humidité relative de l'air, de l'humidité du sol, du vent, de la couverture végétale, et enfin des travaux du sol. Elle est le terme le plus important après les précipitations (P). Elle est la somme des quantités d'eau évaporées à partir de la surface du sol et utilisées par les plantes. Elle est difficile à évaluer à cause de sa pluri dépendance aux facteurs tant biologiques que physiques. Elle correspond à l'évaporation d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour évaporer la quantité d'eau maximale permise par les conditions climatiques (cas des nappes phréatiques peu profondes).

b.Estimation de l'évapotranspiration potentielle (E.T.P) : Nous utilisons deux formules pour l'estimation de l'ETP, qui sont :

b1. Formule de Thornthwaite : Cette formule est basée sur l'analyse mensuelle des diverses composantes du bilan hydrique : on calcule pour chaque mois la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration, compte tenu de l'humidité du sol. La formule de Thornthwaite, établie en 1948, ne tient compte que de la température :

$$ETP = 16 (10 T/I)^a \cdot k \quad (9)$$

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle corrigée (mm)

$$i = (T/5)^{1.514} \quad \Leftrightarrow \quad I = \sum_1^{12} i \quad (10)$$

T = température moyenne mensuelle en °C

$$a = [16 I/100] + 0.5 \quad (11)$$

K : coefficient de correction dépendent de la latitude du bassin versant et donc de l'insolation.

a : indice liée à la température.

- I : indice thermique annuel obtenu à partir de la somme des valeurs mensuelles de température. la formule de Thornthwaite ;

b.2. la formule de Serra :

$$ETP = (1,6 \cdot 10 T / I)^a \quad (7)$$

$$\text{Avec : } I = \sum i \quad \text{avec } i = 0.002 T^3$$

$$a = 1.6 (I/100) + 0.5 \quad (8)$$

3.2. Evapotranspiration Réelle (ETR)

a/ Définition : c'est une fraction de l'ETP qui dépend beaucoup plus de l'état des réserves en eau du sol, et donne des informations sur la quantité d'eau évaporée réellement.

b/ Estimation de l'évapotranspiration Réelle (ETR) : l'évapotranspiration réelle annuelle moyenne est calculée par l'application des équations empiriques telles que celles de Turc et de Coutagne :

- **Formule de Turc :** $ETR = P / [0.9 + P^2 / L^2]^{0.5} \quad (12)$

Avec : P : les précipitations annuelles moyennes en mm

L = 300 + 25 T + 0.05 T³ où T est la température annuelle moyenne en °C

- **Formule de Coutagne :** $ETR = P - \lambda P^2 \quad (13)$

Cette formule n'est valable que lorsque la précipitation de la région d'étude est comprise entre : $1/8\lambda < P < 1/2\lambda$ avec $\lambda = 1/0.8 + 0.4 T$, avec T la température moyenne annuelle exprimée en °C.

3.3. Calcul des réserves facilement utilisables (RFU) : elles sont données par la formule suivante (in J. Ricard 1979)[1,18] :

$$RFU = 1/3 da \cdot He \cdot P \quad (14)$$

Avec : da : Densité apparente du sol

He : Capacité de rétention (%)

P : Profondeur de la terre parcourue par les racines (m)

Application numérique :

$$da = 1.4$$

$$He = 25\% \quad (20\% < Cr < 30\%, \text{ He la valeur moyenne})$$

$$P = 0.25 \text{ m}$$

$$\text{Donc } RFU = 1/3 \cdot 1.4 \cdot 0.25 = 0.0291 \text{ m} = 29 \text{ mm}$$

3.4. Estimation du ruissellement et de l'infiltration : La formule donnant le bilan hydrologique est la suivante :

$$P=R+I+ETR \quad (15)$$

Avec : P:Précipitation (mm) ;R :Ruissellement (mm) ;I :Infiltration(mm) ;ETR : Evapotranspiration réelle (mm)

La lame d'eau ruisselée sera estimée par la formule de Tixeront – Berkaloff qui s'écrit comme suit :

$$R= P^3 / 3(ETP)^2 \quad (16)$$

Avec :

R : Ruissellement annuel (mm) ;

ETP : Evapotranspiration potentielle annuelle (mm) ;

P : Pluviométrie annuelle moyenne (mm)

Sur cette base nous avons établi les bilans hydriques des deux stations de la région d'étude, représentés dans les tableaux 13 à 16 sur des périodes différentes :

Tableau 9 : Bilan hydrique sur une période de 5 ans (1999/2000 / 2003-2004) pour les deux stations

Tébessa	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
T C°	21,82	18,16	11,76	7,28	6,13	7,03	11,41	13,4	19,68	24,12	26,41	26,65
i	9,30	7,04	3,65	1,76	1,36	1,67	3,48	4,44	7,96	10,83	12,42	12,59
I	76,50											
a	1,724											
ETP hC	97,47	71,02	33,58	14,69	10,92	13,83	31,87	42,05	81,58	115,58	135,46	137,59
K	1,03	0,97	0,86	0,85	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16
ETP C	100,39	68,89	28,87	12,48	9,50	11,75	32,83	45,84	98,71	140,18	166,62	159,60

a/ Bilan hydrique à Tébessa (5 ans de 99/00 → 2003/2004)

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
P (M)	43.54	28	39.26	43.78	37.4	13.78	27.58	32.34	46.48	39.06	22.3	18.66
ETPc	100.39	68.89	28.87	12.48	9.50	11.75	32.83	45.84	98.71	140.18	166.62	159.60
ETR	43.54	28	28.87	12.48	8.50	11.75	32.83	45.84	56.73	39.06	22.3	18.66
RFU	0	0	10.39	29	29	29	23.75	10.25	0	0	0	0
DP	56.85	40.89	-10.39	-31.3	-27.9	-2.03	5.25	13.5	52.23	101.12	144.32	140.94
Da	56.85	40.89	0	0	0	0	0	0	0	101.12	144.32	140.94
Ex	0	0	0	12.69	27.9	2.03	0	0	0	0	0	0

$$P = ETR + Ex \rightarrow 392.18 = 349.56 + 42.62$$

b/ Bilan hydrique à Hammamet 5 ans

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
P	25.62	34.36	33.28	32.48	24.68	9.7	18.38	26.54	75.18	27.8	8.44	16.3
ETPc	100.39	68.89	28.87	12.48	9.50	11.75	32.83	45.84	98.71	140.18	166.62	159.60
ETR	25.62	34.36	28.87	12.48	9.50	11.75	32.83	39.04	75.18	27.8	8.44	16.3
RF4	0	0	4.41	24.41	29	26.95	12.5	0	0	0	0	0
DP	74.77	34.53	-4.41	-20	-15.18	+2.05	+14.45	19.3	23.53	112.38	158.18	143.3
Da	74.77	34.53	0	0	0	0	0	19.3	23.53	112.38	185.18	143.3
Ex	0	0	0	0	10.59	0	0	0	0	0	0	0

$$P = ETR + Ex \rightarrow 332.76 = 322.17 + 10.59$$

Tableau 10: Bilan hydrique sur une période de 22 ans (1983/1984 / 2004-2005) pour les deux stations

Tébessa	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
T C°	22,77	16,64	11,85	7,66	7,08	7,63	10,09	13,26	18,42	23,36	26,62	26,93
i	9,92	6,17	3,69	1,90	1,69	1,89	2,89	4,37	7,20	10,31	12,57	12,79
I	75,39											
a	1,70											
K	1,03	0,97	0,86	0,85	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16
ETP C	107,90	59,62	29,68	13,97	12,51	13,88	27,05	45,54	88,4	132,39	168,05	161,63

a/ Bilan global (22 ans) Tébessa

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
P	28.04	27.67	37.84	21.63	29.99	17.57	34.19	25.82	35.45	32.90	14.85	33.19
ETPc	104.22	60.51	31.52	14.27	11.09	13.58	26.56	46.67	89.14	133.37	168.85	159.54
ETR	28.04	27.67	31.52	14.27	11.09	13.58	26.56	46.67	43.6	32.9	14.85	33.19
RF4	0	0	6.32	13.68	29	29	29	8.15	0	0	0	0
DP	76.18	32.84	0	0	0	0	0	20.85	53.69	100.47	154	126.35
Da	76.18	32.84	0	0	0	0	0	0	45.54	100.47	154	126.33
Ex	0	0	0	0	3.58	3.99	7.63	0	0	0	0	0

$$P = ETR + Ex \rightarrow 339.14 = 323.14 + 15.20$$

b/ Bilan global (22 ans) Hammamet

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
P	27.09	26.58	30.78	25.68	28.58	15.85	31.78	23.02	39.10	23.32	10.05	15.96
ETPc	104.22	60.51	31.52	14.27	11.09	13.58	26.56	46.67	89.14	133.37	168.85	159.54
ETR	27.09	26.58	30.78	14.27	11.09	13.58	26.56	46.67	44.45	23.32	10.05	15.96
RF4	0	0	0	11.41	28.9	29	29	5.35	0	0	0	0
DP	77.13	33.93	0.74	0	0	0	0	23.65	50.04	110.05	158.8	143.58
Da	77.13	33.93	0.74	0	0	0	0	0	44.69	110.05	158.8	143.58
Ex	0	0	0	0	0	2.25	5.28	0	0	0	0	0

$$P = ETR + Ex \rightarrow 297.79 = 290.26 + 7.53$$

Tableau 11: Bilan hydrique de la région de Hammamet pour l'année 2002/2003

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars.	Avril	Mai.	Juin.	juillet	Aout.
T° C	21.50	19.60	12.30	7.0	6.90	6.10	10	14.1	18.90	25.20	29.90	27.40
i	9.10	7.91	3.90	1.66	1.62	1.35	2.85	4.80	7.48	11.57	14.99	13.13
P (mm)	10.70	51.0	48	17.40	87.50	24.30	17.30	83.10	25.40	9.0	7.40	4.50
ETPnc (mm)	92.23	78.22	34.13	12.51	12.19	9.79	23.61	43.52	73.32	122.36	165.89	142.01
K	1.03	0.97	0.86	0.85	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16
ETPc (mm)	94.99	75.87	29.35	10.63	10.60	8.32	24.31	47.43	88.71	148.05	204.04	164.73
RFU (mm)	0	0	18.65	25.42	29	29	21.99	29	0	0	0	0
ETR (mm)	10.70	51.0	29.35	10.63	10.60	8.32	24.31	47.43	54.4	9	7.4	4.5
Dp (mm)	-84.29	-24.87	18.65	6.77	76.9	15.98	-7.01	35.67	-63.31	-139.05	-196.64	-160.23
EX.(mm)	0	0	0	0	73.32	15.98	0	28.66	0	0	0	0
DA (mm)	84.29	24.87	0	0	0	0	0	0	34.31	139.05	196.64	160.23

Tableau 12 : Bilan hydrique de la région de Tébessa, pour l'année agricole 2002/2003

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars.	Avril	Mai.	Juin.	juillet	Août.
T° C	21.05	19.60	12.30	7.0	6.90	6.10	10.0	14.1	18.90	25.20	29.9	27.40
i	9.10	7.91	3.91	1.66	1.63	1.35	2.85	4.80	7.48	11.57	14.99	13.13
P (mm)	34.1	40.5	76	28.5	127	38	17.7	95.8	28.6	4.3	2.8	23.1
ETPnc (mm)	92.19	78.62	34.21	12.49	12.18	9.77	23.63	43.65	73.67	123.16	167.15	143.02
K	1.03	0.97	0.86	0.85	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16
ETPc (mm)	94.95	76.26	29.42	10.61	10.59	8.30	24.34	47.58	89.14	149.02	205.59	165.90
RFU (mm)	0	0	29	29	29	29	22.36	29	0	0	0	0
ETR (mm)	34.1	40.5	29.42	10.61	10.59	8.30	24.34	47.58	57.6	4.3	2.8	23.1
Dp (mm)	-60.85	-35.76	46.58	17.89	116.41	29.7	-6.64	48.22	-60.54	-144.7	-202.8	-142.8
EX.(mm)	0	0	17.58	17.89	116.41	29.7	0	19.22	0	0	0	0
DA (mm)	60.85	35.76	0	0	0	0	0	0	31.54	144.72	202.79	142.8

3. 5. Interprétation du bilan hydrique : Le calcul du bilan hydrique de la région d'étude sur deux périodes différentes a permis de tirer les informations suivantes : sur une période de 22 ans allant de 1983 /1984 à 2004/2005, la région d'étude était caractérisée par une évapotranspiration très forte avec respectivement 322mm à Tébessa et 291mm à Hammamet, d'une part, et un excédent très faible, égal respectivement à 10mm à Tébessa et à 6.7mm à Hammamet, d'autre part.

En outre, la région d'étude avait connu une période de sécheresse très intense sur laquelle le déficit agricole a pu atteindre des valeurs très dramatiques, égales respectivement à 537mm à Tébessa et à 568mm à Hammamet. Le coefficient de ruissellement vaut respectivement 17mm et 12mm à Tébessa et Hammamet et ne représente qu'environ 4.5 % des précipitations totales, mais il joue un rôle très important dans l'alimentation des oueds (Bouakous et Serdiès, Chabro) et par conséquent des nappes aquifères existantes.

Concernant le bilan hydrique d'une période de 5 ans, allant de 1999/2000 à 2003/2004, les résultats obtenus sont plutôt positifs et satisfaisants. Ces années étaient marquées par un excédent égal à 10mm à Tébessa et à 7mm à Hammamet.

En conclusion, le bilan hydrique calculé selon la méthode de Thornthwaite reste déficitaire dans les deux périodes car le déficit agricole est toujours supérieur aux excédents. On peut dire cependant que l'année 2002/2003 avait considéré comme excédentaire, du fait, de l'infiltration suffisante qui a eu une influence très positive sur le niveau statique de la nappe dans la zone Hammamet-Ain-chabro (cf. chapitre de l'étude hydrogéologique)

4. Conclusion

La région d'étude est caractérisée par un climat semi aride de type continental, avec un été très chaud et sec et un hiver très froid et humide. La moyenne interannuelle des précipitations tombées est de l'ordre de 339mm à Tébessa et 298mm à Hammamet. Ces pluies sont souvent sous forme orageuse. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 15.91°C avec un maximum au mois de juillet égal à 26.55°C et un minimum au mois de janvier égal à 6.50°C. Le cycle pluviométrique le plus arrosé correspond à l'année 2002-2003 avec un apport de 516.4 mm pour la station de Tébessa, et à l'année 2003-2004 avec un apport de 610.8 mm pour la station de Hammamet.

Au niveau de la station de Tébessa le cycle le plus sec correspond à l'année 1983/1984 avec un apport de 129.2 mm et pour la station de Hammamet il correspond à l'année 1996/1997 avec un apport de 163.4 mm.

Les mois les plus arrosés sont les mois de novembre, janvier, mars, mai, juin et août, avec une valeur moyenne mensuelle maximale égale à 33.98 mm à Tébessa et 39.10 mm à Hammamet au mois de mai. Le mois le plus sec est celui de juillet avec une valeur minimale moyenne mensuelle égale à 14.85 mm à Tébessa et 10.05 mm à hammamet.

L'humidité relative moyenne annuelle est égale à 59.3 % avec des moyennes mensuelles variant entre 39 % en été au mois de juillet et 70.1 % en hiver au mois de décembre. La région d'étude a une durée d'enneigement variant entre 5 et 10 jours par an [d'après SELTZER]. Durant cette période les montagnes des bordures les plus hautes, comme Dj.Mistiri et Dj. Tazbent ainsi que leurs prolongements, reçoivent en hiver des précipitations neigeuses très importantes. Malheureusement il n'existe pas de relevé systématique d'observation de ces précipitations.

Le suivi de la variation du vent à la station météorologique a montré que la direction préférentielle du vent est NW avec une fréquence totale de 32%. Ce type de vent est responsable de la pluviosité de la région, alors que les vents de direction SW sont toujours secs.

Le bilan hydrique calculé selon la méthode de Thornthwaite, reste déficitaire, car le déficit agricole est toujours supérieur aux excédents. Cependant, nous avons constaté que l'année 2002/2003 avait considéré comme une année excédentaire, du fait, de l'infiltration suffisante qui a eu une influence très positive sur le niveau statique de la nappe dans la zone Hammamet-Ain-chabro.

Chapitre IV

Étude Hydrogéologique

1. Introduction : La cartographie de l'aquifère a pour but de représenter sa configuration, sa structure, et de schématiser les fonctions du réservoir et son comportement hydrodynamique. Les cartes piézométriques, établies principalement avec des données sur les niveaux piézométriques, représentent à une date et à une période donnée la distribution spatiale des charges et des potentiels hydrauliques dans une nappe donnée. Elles représentent également les conditions aux limites hydrodynamiques. Il est évident que, le régime naturel des eaux souterraines peut être perturbé par la surexploitation des ouvrages de captages (forages et puits) qui constituent une source d'épuisement et de diminution. C'est ce que nous allons confirmer par l'étude hydrogéologique de la nappe Tébessa Hammamet.

2. Description lithologique de la nappe aquifère Ain chabro –Hammamet : Notre étude concerne plus spécialement l'étude hydrogéologique de la nappe alluviale de Tébessa/Hammamet qui est encaissée dans un bassin d'effondrement d'âge Mio-pliocène, dont la structure lithologique est peu variée. Cette structure est caractérisée par une superposition de haut en bas de cailloutis de calcaire, galets, grès et sable, graviers et argile qui affleurent dans toute la plaine. Aux bordures SW et NE affleurent des niveaux de calcaires Maestrichtien fissurés et séparés du reste des alluvions par des failles. La réalisation de cette étude est destinée à mieux comprendre les caractéristiques hydrogéologiques et hydrodynamiques et la structure du sous système aquifère d'El Hammamet –Ain chabro. La structure lithologique a été largement discutée au chapitre géologique mais on peut encore dire que le sous bassin d'effondrement d'El Hammamet est considéré comme un graben. Les reliefs des bordures sont séparés des alluvions de la plaine par un réseau de failles, avec dans de nombreux endroits, une ceinture d'éboulis et de cônes de déjection masquant le contact entre les reliefs des bordures et les alluvions de la plaine. Concernant les zones aquifères, nous distinguons dans toute la plaine deux zones à potentialité hydraulique différente, l'une forte et l'autre faible, respectivement la zone d'El Hammamet –Ain chabro et la zone d'El Merdja (Centre de la plaine)(Tableau 1, Annexe 2)[1,10,15,19,35]

2.1. Identification des différents niveaux aquifères : A partir de l'analyse des logs stratigraphiques des forages et des données géophysiques recueillies auprès de la direction de l'Hydraulique de la W. de Tébessa, ainsi que de la description lithologique de la plaine, nous avons pu distinguer les différents niveaux susceptibles d'être aquifères, qui sont :

a/ Milieu poreux : représenté par la nappe alluviale, le milieu poreux est réparti sur toute la plaine et capté par la majorité des forage et des puits. Cette nappe est caractérisée par une résistivité variant entre 50 et 200 Ω m au voisinage des bordures calcaires et par une très faible résistivité (< à 20 Ω m) au centre de la plaine, due à son degré de salinité et à la présence de sédiments fins. Il est important de signaler que cette situation est confirmée par des mesures de paramètres physico-chimiques tels que la salinité au niveau de différents forages et puits (voir chapitre hydrochimie).

b/ Milieu Fissuré : ce niveau se trouve à grande profondeur (5 km) au centre de la plaine. En allant vers les bordures, cette profondeur devient de plus en plus faible. Ce milieu est composé essentiellement de calcaires d'âge Maestrichtien, Turonien et Éocène ayant un potentiel hydraulique important qui se traduit par un débit considérable au niveau des sources de Youks, Kissa ...

3. Conditions aux limites : L'établissement de la carte des conditions aux limites se fait en se basant sur les formations géologiques qui contournent le bassin versant et l'arrangement des courbes piézométriques par rapport aux limites topographiques du bassin. Cette carte nous a permis de mieux comprendre le comportement hydraulique du système aquifère ainsi que la relation entre les nappes existantes [1,10,15,19,35]. Nous avons pu acquérir la carte des conditions aux limites de la nappe en question auprès de la direction de l'hydraulique de la W de Tébessa. Cette carte a été établie en 1975 par la compagnie CGG [15]. L'analyse de la carte (Figure 1) nous a permis de déterminer les limites suivantes :

- La bordure Nord : limite à flux sortant ;
- La bordure Sud : limite composée d'une série stratigraphique complète de Bekkaria à Ain Chabro de l'Aptien inférieur au Maestrichtien moyen, ainsi que de calcaires fissurés qui constituent une limite à flux entrant (alimentation du système aquifère) ;
- La bordure NW : limite à flux entrant, comme le montre la carte piézométriques établie ;
- La bordure NE : limite étanche composée par des argiles sableuses du pliocène et des marnes Cénomaniens, et une limite à flux entrant par les calcaires de l'Éocène et du Campanien ;
- La bordure Est : limite à flux entrant composée de sables quartzeux et de cailloutis de calcaire d'âge Pliocène ;
- La bordure Ouest : limite étanche composée par des formations marneuses et des marnes calcaires du Crétacé inférieur.

On peut remarquer que l'alimentation de la nappe alluviale par les calcaires aux bordures est assez complexe. Cette alimentation est due aux jeux de failles qui, par endroits, ont provoqué une discontinuité du niveau fissuré et l'apparition des marnes. En revanche, une alimentation en profondeur est très probable à travers les failles. A cette alimentation s'ajoute l'infiltration des eaux des précipitations efficaces (PE) à travers le remplissage alluvionnaire, qui affleure à la surface, et qui est caractérisé par une perméabilité très forte favorisant davantage l'infiltration des eaux vers la nappe.

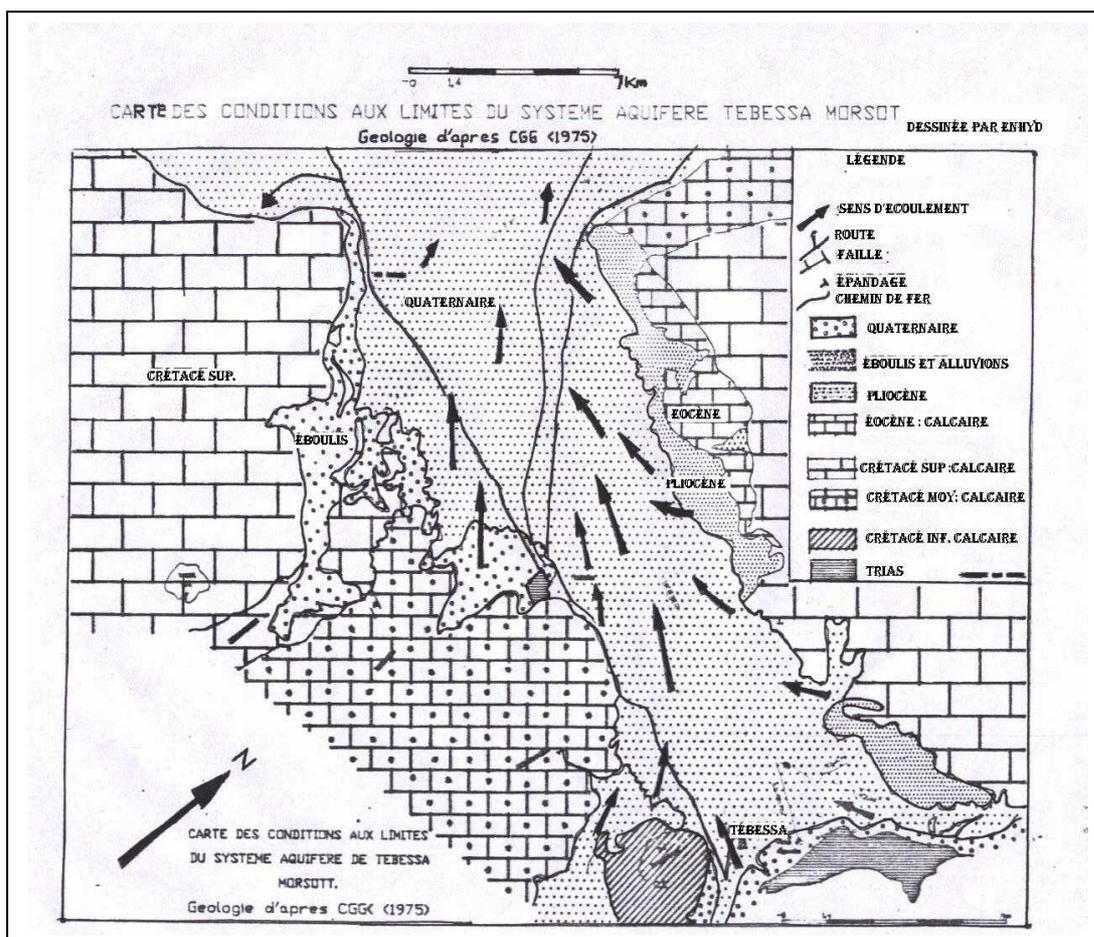


Figure 1 : Carte des conditions aux limites [DHW, Tébessa, 1976]

4. Carte piézométrique : Les eaux souterraines sont le moyen de transport de toute substance minérale ou organique. C'est d'après le sens d'écoulement qu'on peut situer les zones vulnérables à la pollution et celles susceptibles de contaminer. Dans le but de connaître la morphologie

souterraine et de vérifier les conditions aux limites hydrodynamiques de la nappe alluviale de la région d'étude et surtout à la bordure SW de la nappe aquifère Tébessa – Hammamet, nous avons établi deux cartes piézométriques relatives à la période de hautes eaux de l'année 2005 et 2006 à partir des données piézométriques que nous avons effectuée sur 32 puits et forage (Figure 2)

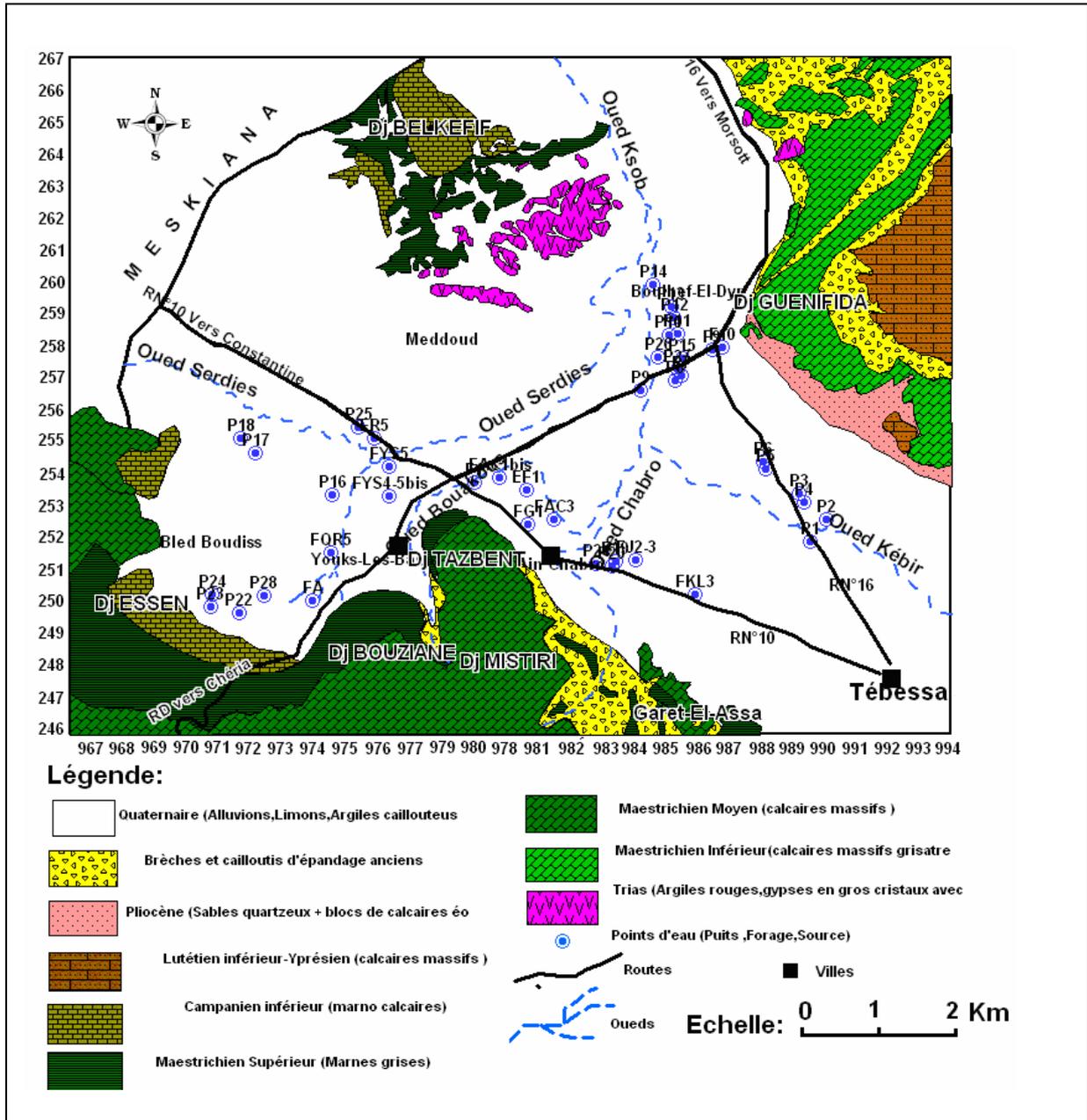


Figure 2 : Carte d'inventaire des points d'eau existants dans la région d'étude) [77,78,79,80,81,82]

4.1 Interprétation des cartes piézométriques établies : Les travaux d'exploitation et les études hydrogéologiques précédentes sur la plaine Tébessa Hammamet ont montré la présence d'un grand système aquifère alluvionnaire d'âge Mio-plio-quaternaire occupant toute la surface de la plaine, où l'écoulement souterrain des eaux a une direction générale SE-NW. Ce système de grande potentialité aquifère est caractérisé par une morphologie piézométrique presque constante pendant les années précédentes (1970).

Actuellement, l'allure des courbes piézométriques est devenue un peu plus complexe et reflète beaucoup plus la surexploitation au niveau de quelques forages. L'analyse des cartes piézométriques établies sur la base des données récentes de nos campagnes piézométriques (2005,2006), montre que les courbes isohypses présentent une surface piézométrique irrégulière. Les axes d'écoulements secondaires montrent un écoulement convergent vers la zone d'Ain Chabro

(presque le centre de la plaine). La direction générale de l'écoulement est Ouest-Est, montrant ainsi une alimentation de la plaine par les eaux provenant de la zone Ouest.

Dans la zone d'Ain chabro, les courbes hydro-iso-hypses, sont moyennement espacées, et le gradient hydraulique est de l'ordre de 0,020 à 0,03 soit 20 à 30 %. On note la présence d'une dépression de la surface piézométriques au niveau du forage J_{2-3 bis}, et E₁ dans la partie E et au NE au niveau d'un puits, ce qui est dû certainement à une exploitation intensive.

Pour la zone de Hammamet, les courbes, sont presque serrées au voisinage des forages (YS₄, YS_{4-5bis}, R₅), et le gradient hydraulique, est de l'ordre de 0.03 soit 30 % L'analyse des cartes obtenues montre aussi la présence de trois sous système aquifères (sous bassins hydrogéologiques) séparés par deux lignes de partage des eaux. Cette dernière se développe autour de la zone Ain Chabro Hammamet et l'individualise du reste de la nappe alluviale Tébessa-Morsott-Hammamet, ce qui nous laisse constaté que cette zone constitue un sous système aquifère isolé de l'ensemble (Fig.3,4).

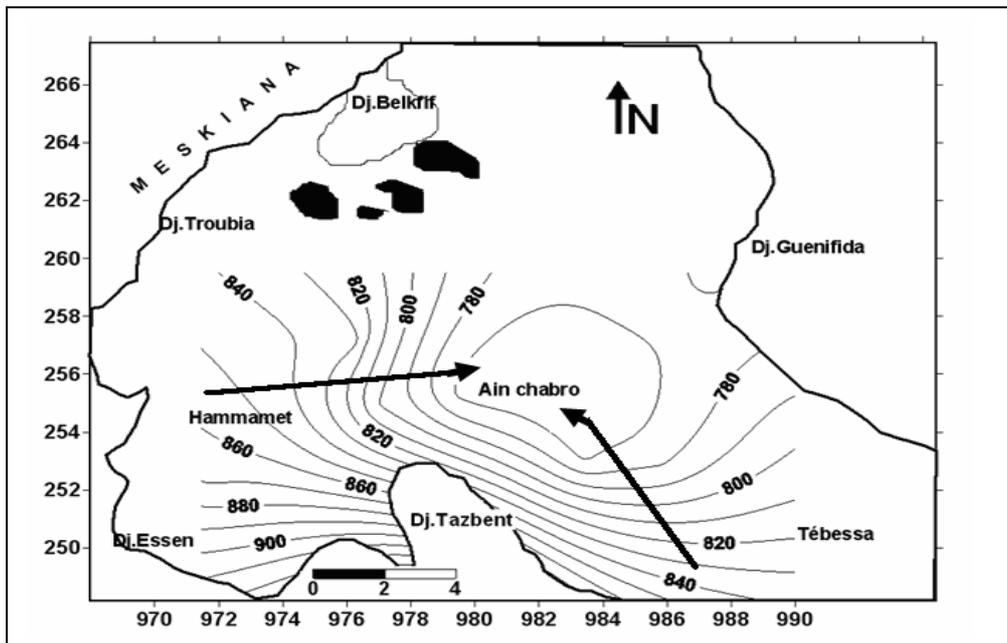


Figure 3: carte piézométriques (Mai, 2005) [77,78,79,80,81,82]

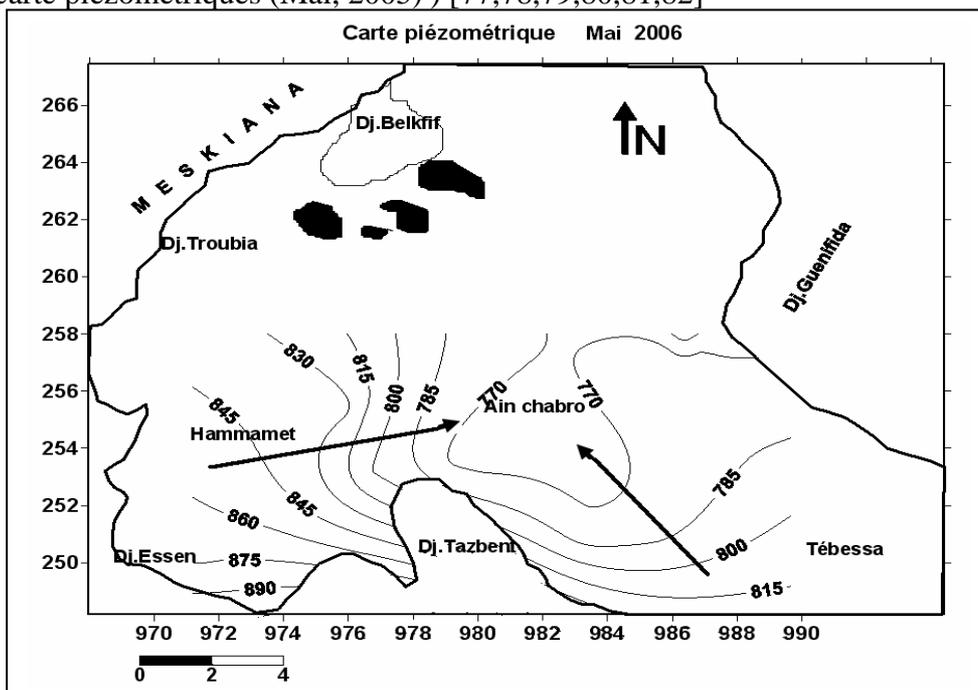


Figure 4 : Carte piézométriques de la zone d'étude (Période Hautes Eaux Mai 2006) [77,78,79,80,81,82]

5.Étude des paramètres hydrodynamiques : La nappe alluviale de Tébéssa Hammamet- Morsott, constitue l'une des nappes les plus stratégiques dans la W. de Tébéssa et la ressource et la réserve d'eau principale de la région, destinée à l'AEP et AEI et L'AEA. Les services d'hydraulique de la W. de Tébéssa sont très intéressés par l'exploitation de cette nappe depuis l'année 1970.

Actuellement, plus de 22 forages ont été forés et captent cette nappe avec un débit d'exploitation total égal $Q_{exp}=356l/s$. Il existe un seul piézomètre au niveau de la zone de Ain Chabro et un autre dans le champ captant de la zone de Hammamet. Ces derniers, nous ont permis de suivre l'évolution des réserves en eau de la nappe (Niveau dynamique, alimentation, rabattement..) dans le temps et en fonction des conditions climatiques de la région. Les valeurs de la transmissivité et de la perméabilité sont obtenues par l'interprétation des essais de pompages réalisés dans les forages existants dans la région d'étude :

5.1. Carte de la perméabilité : La perméabilité est directement liée à la transmissivité. L'analyse de la carte réalisée a montré que la zone de forte perméabilité se situe dans la zone de Ain chabro-oued Bouakous où elle peut aller jusqu'à 6×10^{-4} m/s. Par contre, dans la zone de Hammamet, les valeurs sont moyennes et varient entre 1 et 3×10^{-4} m/s. Les faibles valeurs sont observées dans la partie Est de la plaine de Tébéssa (Figure 5)

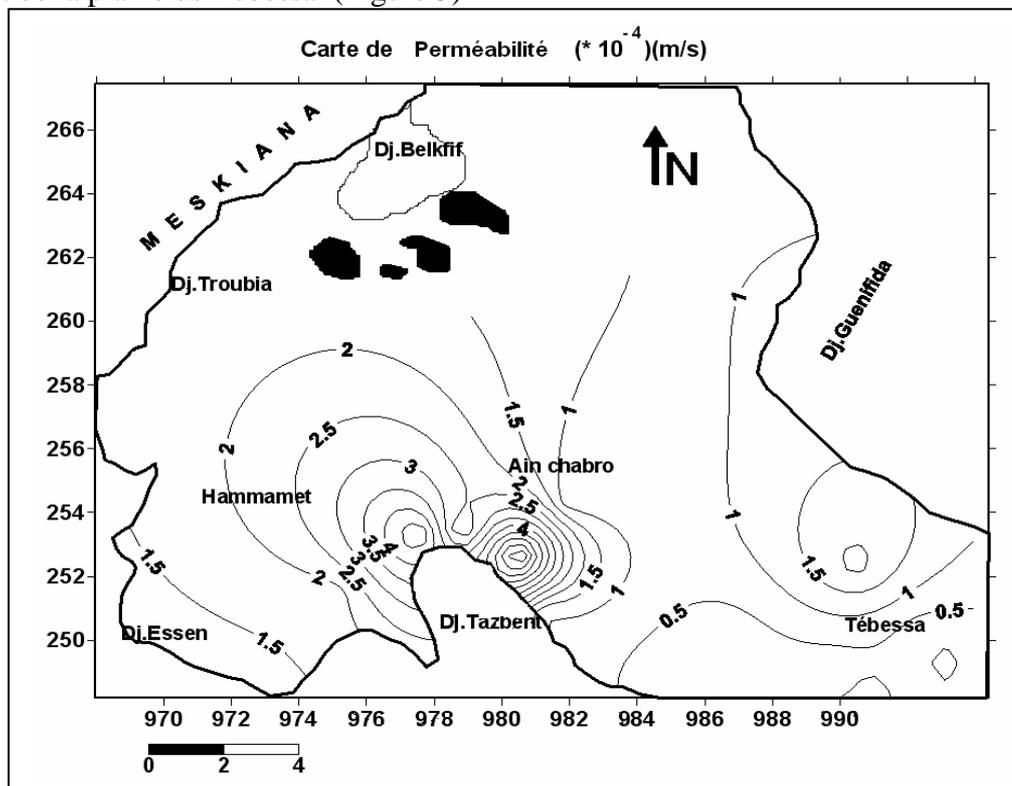


Figure 5 : Carte de perméabilités de la zone d'étude ($\times 10^{-4}$ m/s) [77,78,79,80,81,82]

5.2. Carte des transmissivités : L'analyse de la carte (Fig.6) nous laisse remarquer certaines variations, qui sont probablement dues, à l'hétérogénéité de l'aquifère. Nous distinguons des endroits de fortes transmissivités et d'autres à faibles transmissivités. Dans la zone de Ain chabro -oued Bouakous, les valeurs sont fortes, de l'ordre de 24×10^{-3} m²/s, ce qui est confirmé par l'étude géophysique indiquant la présence de graviers et de cailloutis de calcaires. Par contre, dans la zone de Hammamet –Meddoud et la partie Est de la plaine, on note des valeurs moyennes qui varient entre 4 et 12×10^{-3} m²/s, ce qui est expliqué par la présence des argiles et des éléments plus fins qui dominent les formations existantes au centre de la plaine.

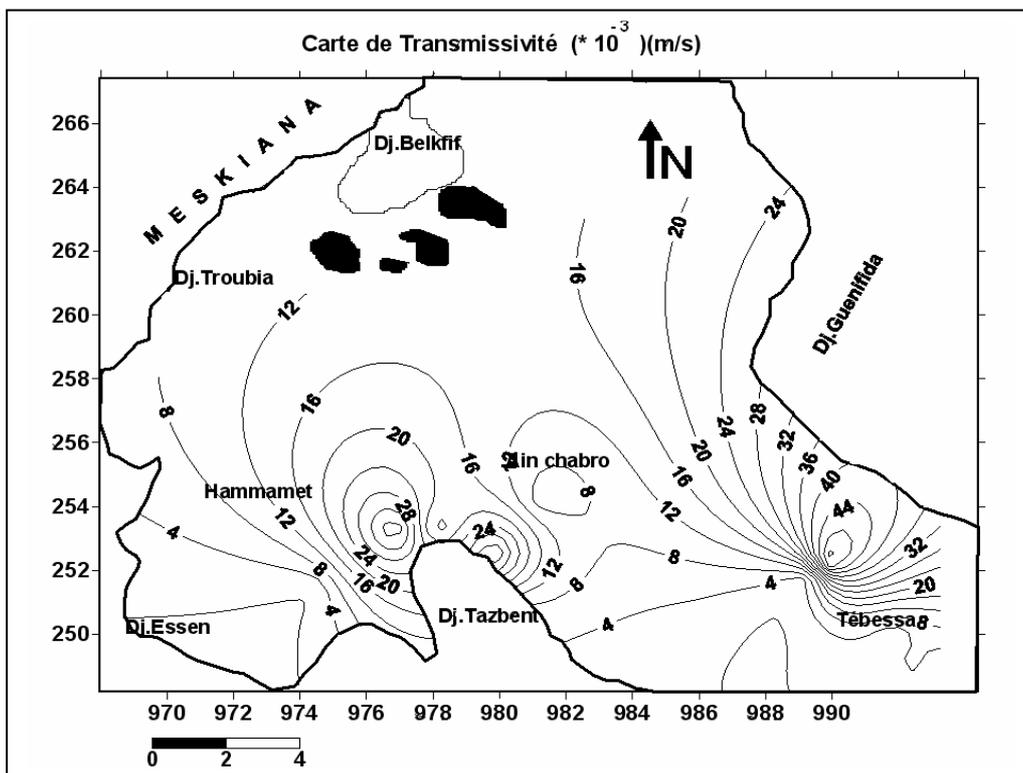


Figure 6 : Carte de transmissivités de la zone d'étude ($\times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) [77,78,79,80,81,82]

6. Interprétation des coupes hydrogéologiques réalisées : Afin d'identifier le sens d'écoulement souterrain au niveau du sous système aquifère Ain chabro-Hammamet, et de vérifier la position de la ligne de partage des eaux souterraines, nous avons établi deux coupes hydrogéologiques (Figure.7, 8) qui passe par des forages principaux dans la région d'étude. Il existe une ligne de partage des eaux qui sépare le sous système aquifère du reste de l'ensemble au niveau du forage AC_{1bis}.

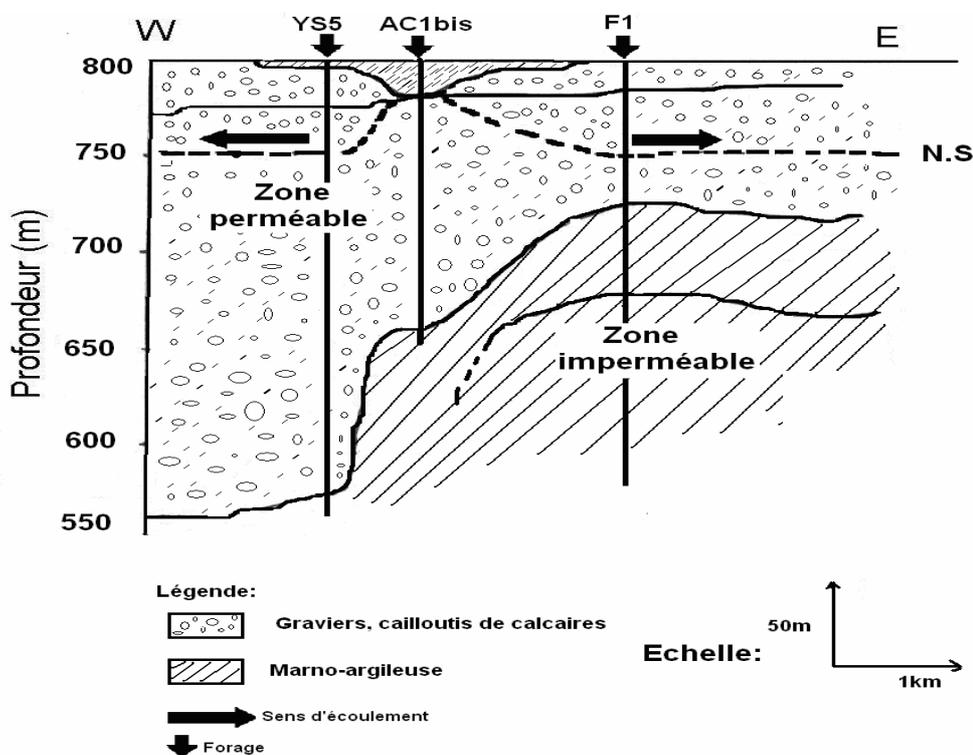
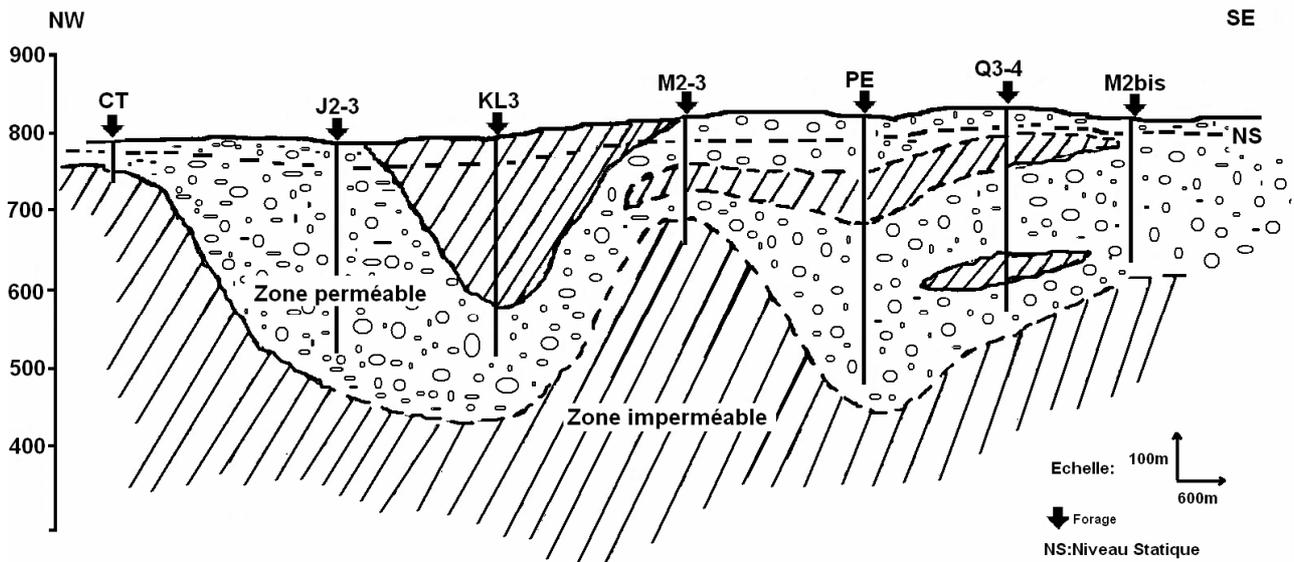


Figure 7 : Coupe hydrogéologique schématique) [77,78,79,80,81,82]



Coupe hydrogéologique dans la région de Tébessa

Figure 8 : Coupes hydrogéologiques schématiques dans la région d'étude

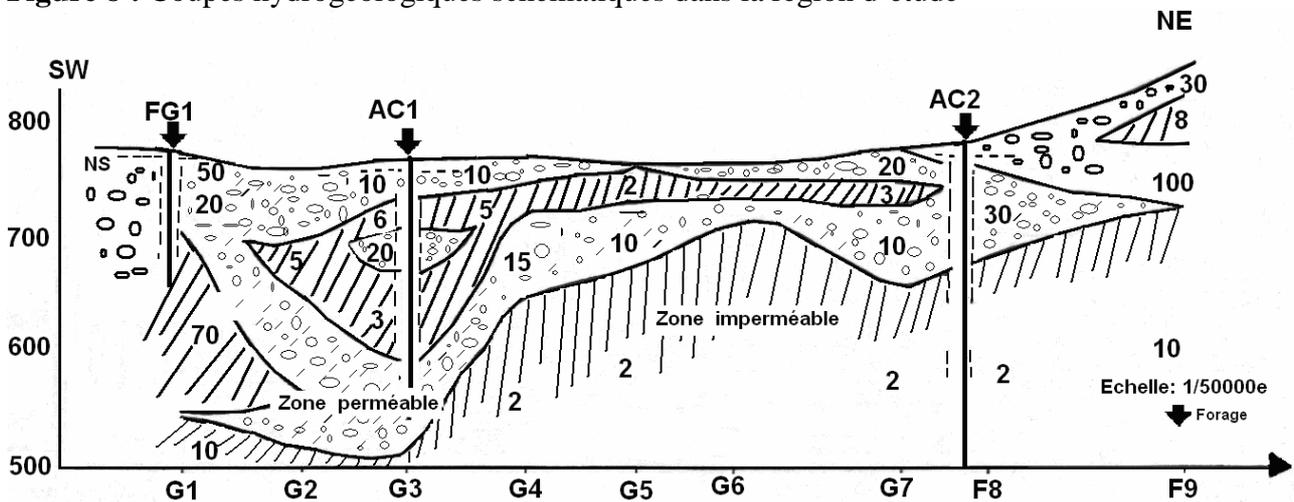


Figure 9 : Coupe géo électrique transversale ouest dans la zone d'Ain Chabro

Sur la coupe géo électrique transversale établie sur le profil de la coupe hydrogéologique (FG₁, AC₁, AC₂) d'une direction SW-NE (Figure9), on a remarqué l'existence de trois horizons dont un est résistant. Le second moyennement résistant et le dernier est conducteur :

- l'horizon résistant : caractérisé par une résistivité comprise entre 100 et 200 Ohm et une épaisseur de 25 à 125 m. A l'intérieur de cette lentille il existe une deuxième lentille conductrice (80 Ohm) d'une épaisseur comprise entre 10 et 40 m ;
- l'horizon moyennement résistant : cet horizon est allongé sur toute la coupe et traversé par les trois forages, son épaisseur varie entre 40 et 225m et sa résistivité varie entre 10 et 50 Ohm ;
- l'horizon conducteur : c'est une lentille qui se trouvait à l'intérieur de l'horizon moyennement résistant, d'une épaisseur de 10 à 150 m et des résistivités très faibles formant une couche imperméable composée par des marnes et des argiles ;
- Le substratum : formé par des marnes et des argiles d'une résistivité <100Ohm.

7. Étude de la variation du niveau statique en fonction des précipitations : Dans la région d'étude, il existe deux piézomètres, conçus spécialement au contrôle de la variation du niveau statique au niveau de la zone de Ain chabro et Hammamet. Selon les données recueillies auprès de

l'ANRH de la W de Tébessa, nous avons pu établir deux courbes de variations de niveau statique (N.S) en fonction du temps et des précipitations moyennes mensuelles [77,78,79,80,81,82].

L'analyse des figures 10,11 a montré que : le niveau statique a augmenté d'une valeur de l'ordre de 1,24 à 2,11 m dans la zone de Ain-chabro, pendant l'année 2002/2003, d'une part, et par une valeur comprise entre 1,22 et 4,43 m pendant la même période dans la région de Hammamet, d'autre part. Cette remonté du niveau dans les deux zones, avait dû certainement aux précipitations tombées pendant la même période 2002/2003 qui a été considérée comme une année excédentaire, où le calcul de bilan hydrique a montré une part d'eau infiltrée très importante. Ceci explique bien l'alimentation des eaux de la nappe par les eaux de pluies.

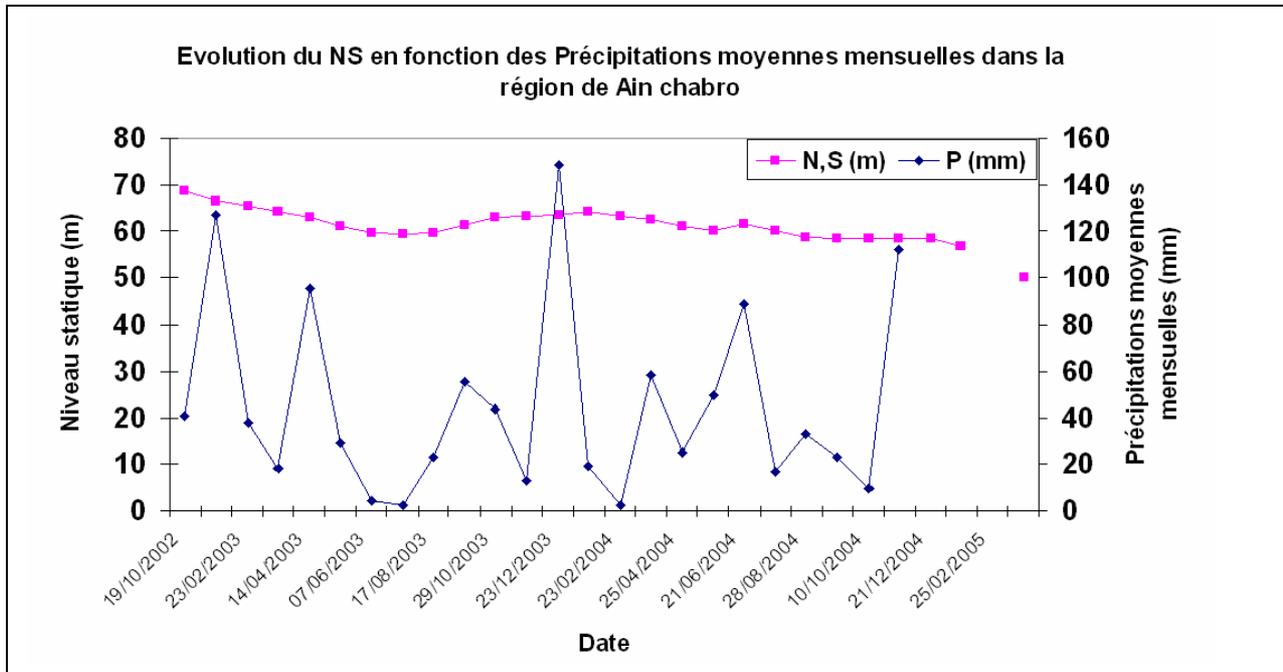


Figure 10: Variation du niveau piézométrique en fonction des précipitations mensuelles (Ain-Chabro) [77,78,79,80,81,82]

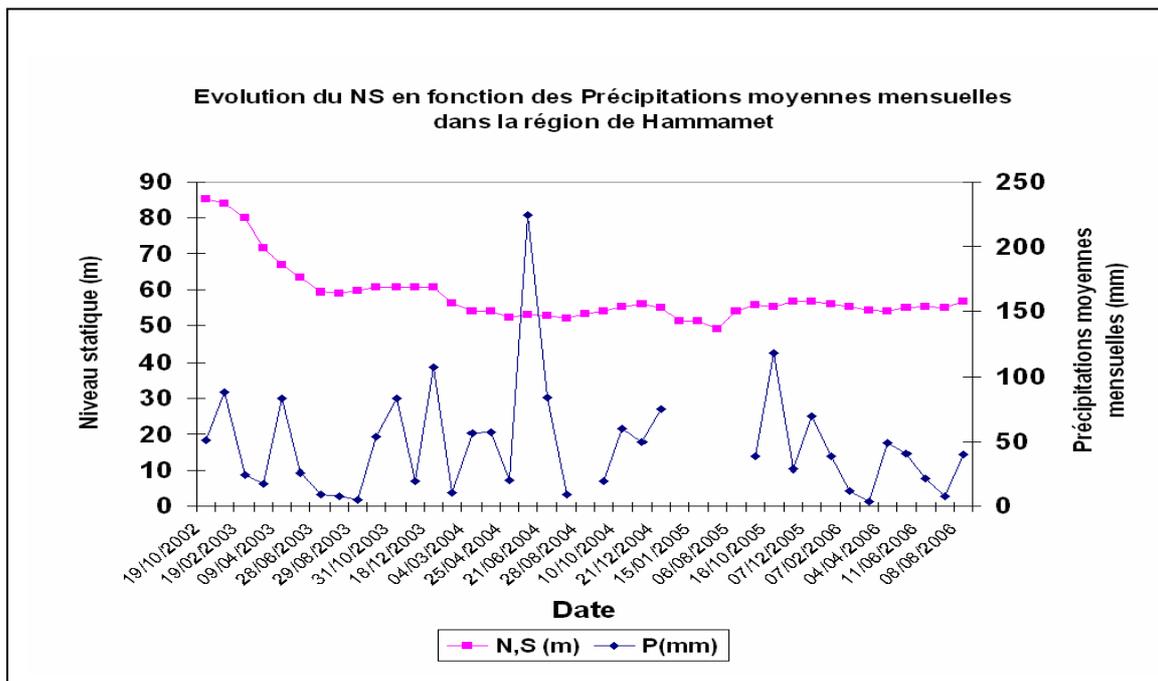


Figure 11: Variation du niveau piézométrique en fonction des précipitations mensuelles (Hammamet) [77,78,79,80,81,82]

8. Bilan du système aquifère

a. Entrée : Compte tenu de sa situation géographique et climatique, la nappe alluviale est alimentée par des précipitations efficaces (PE) qui égalent la différence entre les précipitations tombées (P) et l'ETR.

b. Sortie : Les précipitations efficaces se répartissent à la surface du sol en différentes fractions inégales comme suit :

- le ruissellement (R) qui alimente l'écoulement de surface Q_s collecté par le réseau hydrographique du bassin versant ;
- l'infiltration (I), quantité d'eau franchissant la surface du sol et qui entretient l'écoulement souterrain (Q_w) ;
- le pompage. Selon l'organisme qui gère la distribution de l'eau potable aux citoyens (l'E.P.D.E.M.I.A et DHW de la W.de Tébessa), le débit d'exploitation est de 365 l/s à Tébessa et de 67 l/s à Hammamet soit respectivement $11.51064 \text{ hm}^3/\text{an}$ et $2.112912 \text{ hm}^3/\text{an}$.

La comparaison des gains et des dépenses de la région d'étude [Tableau 2] montre qu'il y a une différence négative entre les entrées et les sorties, donc un bilan déficitaire dans les deux régions, sur les deux périodes (21 ans et 5 ans). En revanche le bilan de l'année 2002/2003 montre qu'il y a une quantité d'eau infiltrée très importante, ce qui prouve la recharge naturelle de la nappe en question par les eaux météoriques.

Généralement, cette situation, que se soit déficitaire ou excédentaire, est liée directement aux conditions climatiques de la région, et à la forte exploitation par pompage [1,10,15,78,79,80,81,82].

Tableau 2 : Bilan du système aquifère de la région d'étude [1,19]

Région	Période	Les entrées	Les sorties
Tébessa S=156.75 km²	1984/2003 (21 ans)	PE = $1.59 \times 10^6 \text{ m}^3$	R = $2.60205 \times 10^6 \text{ m}^3$ I = 0 $Q_{\text{EXP.}} = 11.51064 \text{ hm}^3/\text{an}$
	2000/2005 (5 ans)	PE = $6.68 \times 10^6 \text{ m}^3$	R = $4.109985 \times 10^6 \text{ m}^3$ I = $2.57 \times 10^6 \text{ m}^3$ $Q_{\text{EXP.}} = 11.51064 \text{ hm}^3/\text{an}$
	2002/2003	PE = $34.98 \times 10^6 \text{ m}^3$	R = $8.65573 \times 10^6 \text{ m}^3$ I = $2.631 \times 10^6 \text{ m}^3$ $Q_{\text{EXP.}} = 11.51064 \text{ hm}^3/\text{an}$
Hammamet S=103.5 km²	1984/2003 (21 ans)	PE = $0.69 \times 10^6 \text{ m}^3$	R = $1.233 \times 10^6 \text{ m}^3$ I = 0 $Q_{\text{EXP.}} = 2.112912 \text{ hm}^3/\text{an}$
	2000/2005 (5 ans)	PE = $1.09 \times 10^6 \text{ m}^3$	R = $1.65 \times 10^6 \text{ m}^3$ I = 0 $Q_{\text{EXP.}} = 2.112912 \text{ hm}^3/\text{an}$
	2002/2003	PE = $12.20 \times 10^6 \text{ m}^3$	R = $2.40 \times 10^6 \text{ m}^3$ I = $9.8055 \times 10^6 \text{ m}^3$ $Q_{\text{EXP.}} = 2.112912 \text{ hm}^3/\text{an}$

9. Conclusion

Dans la région d'étude on distingue deux types d'exploitations des ressources en eau, l'une par l'implantation de puits à faible profondeur (9 et 30 m), pour capter les eaux des nappes phréatiques, l'autre type, par l'exécution des forages profonds (60 et 250m) pour capter les eaux des niveaux aquifères plus profonds.

Notre étude a été consacrée plus spécialement à l'étude hydrogéologique de la nappe alluviale de Tébessa/Hammamet qui est encaissée dans un bassin d'effondrement d'âge Mio-pliocène dont la structure lithologique est variée. Cette structure est caractérisée par une superposition de haut en bas des cailloutis de calcaires, galets, grès et sables, graviers et argiles qui affleurent dans toute la plaine. Aux bordures (SW et NE) affleurent des niveaux de calcaires Maestrichtien fissurés et séparés du reste des alluvions par des failles. D'après les terrains traversés par les forages localisés au niveau de cette zone et à partir des logs stratigraphiques des forages de la zone d'étude, nous pouvons signaler la présence de deux types aquifères :

- Le premier type, caractérisé par une perméabilité de fissures formées par les calcaires Maestrichtien et Turonien ;
- Le deuxième type, caractérisé par une perméabilité d'interstices composés essentiellement par des cailloutis de calcaires d'une épaisseur de 200 m.

Les travaux d'exploitation sur la plaine Tébessa-Hammamet, ont montré la présence d'un grand système aquifère alluvionnaire d'âge Mio-plio-quadernaire, occupant toute la surface de la plaine, où l'écoulement souterrain des eaux a une direction générale SE-NW. L'analyse des cartes piézométriques établies a montré que les courbes isohypes présentent des surfaces piézométriques irrégulières avec la présence des zones de dépressions due à la surexploitation de la nappe.

Dans la zone d'Ain chabro, les courbes hydro-iso-hypses sont moyennement espacées, le gradient hydraulique est de l'ordre de 0,020 à 0,03 soit 20 à 30 %. On note la présence d'une dépression de la surface piézométriques au niveau du forage J2-3 bis, et E1 dans la partie E et au NE au niveau des puits d'agriculteurs, ce qui est dû, certainement à une exploitation intensive. Pour la zone de Hammamet, les courbes sont presque serrées au voisinage des forages (YS4, YS4-5bis, R5), le gradient hydraulique est de l'ordre de 0.03 soit 3 %

D'après cette carte, on note aussi l'existence des axes d'écoulements secondaires de direction SW-NE et NW-SE, ce qui montre bien l'alimentation de la nappe par les bordures sud ouest de la région d'étude.

L'analyse des cartes de perméabilités et de transmissivités montre bien que la zone d'étude est dotée de bonnes caractéristiques hydrodynamiques.

L'analyse des figures 9,10 a montré que le niveau statique a augmenté d'une valeur de l'ordre de 1,24 à 2,11 m dans la zone d'Ain Chabro, et entre 1,22 et 4,43 m dans la région de Hammamet pendant l'année 2002/2003. Cette élévation est due certainement aux précipitations importantes. Ceci explique bien l'alimentation des eaux de la nappe par les eaux des pluies efficaces.

La comparaison des gains et des dépenses des réserves en eau dans la région d'étude a montré que, le bilan est déficitaire dans les deux régions et sur les deux périodes (21 ans et 5 ans), par contre le bilan de l'année 2002/2003 est plutôt excédentaire.

Deuxième Partie

**Étude de la qualité hydro chimique et
bactériologique, vulnérabilité à la
pollution et protection des ressources en
eau**

1.Étude de la qualité Hydro chimique des eaux

1. Introduction : Les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines sont nombreuses, et la composition chimique d'une eau joue un rôle important dans la détermination de sa qualité, et de son utilisation pour l'alimentation en eau potable ou d'autres usages (irrigation, industrie, etc.) [23]. La température, la résistivité et les sels dissous se comportent fréquemment comme des marqueurs naturels permettant d'étudier les caractéristiques hydrogéologiques de la couche aquifère et les facteurs d'écoulement souterrain. L'étude de leur variation dans l'espace et dans le temps permet de compléter les informations déjà obtenues sur la nature lithologique du terrain traversé.

Il faut noter que les normes de qualité des paramètres physico-chimiques des eaux sont souvent déterminées en fonction des utilisations (eaux potables, industrielles, d'irrigation) ; ces normes peuvent limiter les possibilités d'emploi et l'importance des ressources exploitables.

En raison des multiples utilisations des eaux de la nappe alluviale Ain chabro-Hammamet (AEP, AEA, AEI), cette étude a été menée afin de contrôler l'état actuel de la qualité chimique des eaux, leur évolution dans le temps, dans l'espace et en fonction de la variation des paramètres physico-chimiques.

Dans le but d'identifier les caractéristiques physico-chimiques, et d'étudier la qualité hydro chimique des eaux de la région d'étude, un plan de travail a été adopté, qui, consiste d'abord à réaliser un suivi périodique des trois types d'eaux (eaux de surface au niveau de oued Bouakous, nappe superficielle, et nappe profonde) pendant les périodes de hautes et basses eaux des années 2005/2006, avec une analyse plus ou moins complète des paramètres physico-chimiques, puis à déterminer les différents apports anthropiques à caractère polluant dans la région, et enfin à analyser leur composition physico-chimique, pour expliquer l'origine de la salinité des eaux et leur évolution.

2. Paramètre de qualité : La composition physico-chimique de l'eau souterraine reflète le milieu géologique dans lequel elle circule, et certains éléments sont parfois présents en concentrations particulièrement élevées sans qu'il y ait un risque sur la santé des consommateurs. Dans certains cas, l'eau captée peut avoir un goût salé, une couleur jaunâtre ou dégager une odeur, facteurs qui témoignent de la présence en concentrations élevées de certains éléments comme le fer, le manganèse, les sulfures, les chlorures, etc.. Par contre, l'eau captée, même lorsqu'elle présente une apparence claire et paraît de bonne qualité, peut dissimuler des éléments en concentrations dommageables pour la santé.

La qualité et la potabilité de l'eau peuvent donc être remises en cause par la présence, entre autres, de bactéries, de virus, de nitrates, d'arsenic, qui ne donnent aucun goût, aucune couleur ni aucune odeur à l'eau. Bien que l'eau souterraine soit généralement de meilleure qualité que l'eau de surface, elle demeure d'une importance capitale et fait l'objet de nombreuses analyses des paramètres physico-chimiques et microbiologiques. Ces analyses permettent de préciser, s'il y a lieu, la source de pollution et le type de traitement à appliquer pour en minimiser les effets désagréables et respecter les normes du règlement sur la qualité de l'eau potable [1,19] (Annexe 3).

2.1. Détérioration de la qualité : La qualité naturelle des eaux souterraines peut être endommagée par l'effet de lessivage des formations gypseuses (existence de Trias) et l'activité humaine. De ce fait, l'eau des nappes souterraines n'est pas à l'abri de la pollution et l'autoépuration naturelle n'est pas complète dans toutes les zones de la nappe vis-à-vis de certaines substances. Les nappes libres sont les plus vulnérables aux polluants d'origine superficielles qui peuvent diffuser librement dans le sol et dans la zone non saturée jusqu'au niveau piézométriques.

Pour le cas particulier de la nappe alluviale de Tébessa- Hammamet, l'étude des paramètres physico-chimiques nous a permis d'identifier l'effet de différents types de pollution sur la qualité chimiques des eaux souterraines.

3. Apports anthropiques : Vu la forte activité urbaine, industrielle et agricole qui se développe dans la zone d'étude, plusieurs sources de contaminations ont été détectées : l'une d'origine

anthropique, due aux rejets directs des eaux usées et à l'utilisation des engrais chimiques dans l'agriculture, et l'autre, d'origine naturelle essentiellement due à l'effet des formations géologiques. L'ensemble de ces apports induit une pollution chimique qui provoque l'augmentation de la concentration des éléments chimiques dans les eaux superficielles et souterraines et conduites à une dégradation de leur qualité.

3.1. Les Rejets urbains et industriels : Ils sont liés aux rejets des agglomérations par les réseaux d'assainissement. Ces apports sont caractérisés par de fortes teneurs en ammonium (NH_4^+) et en phosphate (PO_4^-). Les réseaux d'assainissements de la ville de Tébessa et ses petites agglomérations ne sont pas séparatifs, et l'évacuation des eaux pluviales et domestiques se fait dans le même réseau. Ces dernières se composent essentiellement d'eaux ménagères et vanes (les eaux vanes sont constituées d'urines, de matières fécales diluées avec de l'eau de chasse ; l'urine dégage des ions Cl^- , Na^+ , K^+ , des matières organiques telles que les urées qui se transforment rapidement, en milieu anaérobie, en azote ammoniacal NH_4^+) [11,35].

Des analyses chimiques ont été réalisées, précédemment dans des études antérieures, sur les huit rejets des agglomérations qui rejettent directement leurs effluents dans les oueds (Zaarour, Naguès, Rafana, El Hammamet et de l'Université de Tébessa), et les rejets industrielles d'Elatex. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 1 : résultats des analyses des eaux usées dans la région d'étude [35]

Rejets urbain/industriel	X (Km)	Y (Km)	Ca^{+2} (mg/l)	Mg^{+2} (mg/l)	Na^+ (mg/l)	K^+ (mg/l)	Cl^- (mg/l)	SO_4^{-2} (mg/l)	HCO_3^- (mg/l)	$\text{NH}_4^+ * 10^{-3}$ (mg/l)	$\text{PO}_4^{-3} * 10^{-2}$ (mg/l)	$\text{NO}_2^- * 10^{-3}$ (mg/l)	NO_3^- (mg/l)
Oued Zarour	994,05	248,55	278,2	65,6	170	43,9	268	256	573,44	117,8	20,16	392,82	90
Oued Naguès	992,4	248,46	220,7	76,8	161	31,2	202,7	331,7	541,55	121,88	18,45	451,72	-
Oued Rafana	991	248,99	176,75	87,6	251,85	44,6	210,8	288,48	701,5	148,2	14,77	287,96	132
Hammamet	975,2	251,85	160	61,2	253	39	288,28	215,6	631,35	120,7	7,44	461,92	-
Université	986,2	250,18	158	80,28	243,8	42,9	234,7	254,8	605,08	84,81	10,88	262,66	-
Elatex amont	989,8	248,85	209,75	86,92	127,44	23,84	229,4	278,25	507,2	68,7	3,91	500,38	-
Elatex aval	989,85	249,08	192	84,8	169	19,5	291,1	309,6	467,87	116,41	2,79	454,48	-

Cette analyse montre une eau alcaline, riche principalement en deux éléments chimiques : l'ammonium, lié principalement aux déchets humains (urines), et le phosphate qui est essentiellement dû à l'utilisation des produits détergents. Ces deux rejets (industriels et urbains) représentent un danger majeur sur la qualité des eaux, vu les fortes concentrations en polluants chimiques. Leur influence, sur la qualité des eaux de la nappe superficielle sont très nettes, surtout dans quelques puits de faible profondeur.

3.2. L'agriculture : Son influence apparaît par l'effet de l'utilisation intensive des produits fertilisants (chimiques ou organiques) sur les terrains perméables, ces derniers permettant une infiltration directe de la forme azotée (nitrate) vers la nappe. Plusieurs cas de contamination ont été observés au niveau de la nappe superficielle avec des concentrations élevées en nitrates qui atteignent dans certains endroits 90 mg.l^{-1} .

4. Les apports naturels : Ils jouent un rôle majeur dans l'acquisition des éléments chimiques, *via* la dissolution des formations géologiques. Le danger de ce processus apparaît lorsque les concentrations des éléments dépassent les limites de potabilité. Dans la région d'étude une seule cause naturelle est responsable de l'augmentation de la concentration de ces éléments chimiques, c'est la dissolution des formations alluvionnaires et évaporitiques : l'existence des lentilles gypseuses et salifères (au pieds de Dj,Belkif) favorise une dissolution rapide des éléments évaporitiques Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} et SO_4^{2-} . Ces derniers entraînent une augmentation importante de la salinité des eaux et de la conductivité qui atteint $9120 \mu\text{S.cm}^{-1}$ [78,79,80,81]

Le traitement des données recueillies va nous montrer la variation de la qualité de nos ressources hydriques superficielles ou souterraines et nous expliquera, par conséquent, l'origine de leurs salinités.

5. Méthodologie de travail

5.1. Prélèvements : Ils sont effectués selon une répartition et une fréquence différente d'un point à un autre, suivant la nature des eaux (superficielles, souterraines), le type des formations géologiques, la profondeur de l'ouvrage de captage, les implantations agricoles existantes et la disponibilité des ouvrages. On distingue les prélèvements suivants :

- les eaux de surface sont généralement échantillonnées en 3 stations positionnées au niveau d'oued Bouakous (oued amont, oued aval, source d'émergence) ;
- Les eaux de la nappe superficielle sont prélevées dans 28 puits choisis pour ce suivi. Les prélèvements sont très serrés dans les zones agricoles, et plus distantes dans les zones non aménagées ;
- Les eaux de la nappe profonde sont prélevées dans 24 forages, qui se répartissent dans le secteur d'étude selon un profil Est-ouest et Nord Est -Sud Ouest.

5.2. Mesures *in situ* : Quatre paramètres physico-chimiques (T, pH, conductivité, O₂) sont mesurés *in situ*, immédiatement après le prélèvement de l'échantillon à l'aide d'un appareil multi paramètres.

5.3. Analyses des éléments chimiques : Une analyse plus ou moins complète des éléments chimiques a été effectuée pour cette étude : les éléments majeurs (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ et HCO₃⁻; NO₃⁻, NO₂⁻), les éléments mineurs en traces (PO₄³⁻, F⁻, Si⁴⁺), et les éléments métalliques en traces (Fer (total), Mn²⁺). Environ 200 échantillons ont été analysés au total. L'analyse des bicarbonates (HCO₃⁻), du titre alcalimétrique (TA, TAC) et de la dureté totale (DH°) était effectuée au Laboratoire des Sciences de la Terre à l'Université de Tébessa (Algérie) par volumétrie [68].

Concernant les analyses des éléments majeurs, les échantillons d'eau sont pris dans des flacons en plastique (polyéthylène), filtrés à l'aide de filtres-seringues stériles à 45 µm ; ceux destinés aux cations et métaux lourds sont acidifiés à un pH<2. Les échantillons sont conservés immédiatement dans un réfrigérateur à une température inférieure à 4°C, et envoyés directement au laboratoire de l'Université de Genève à l'Institut F-AForel (Suisse) pour l'analyse des cations et des éléments traces par la méthode d'ICP-MS, tandis que les anions sont déterminés au laboratoire LGIT de l'Université Joseph Fourier à Grenoble, France.

Pour les différentes analyses, la balance ionique est inférieure à 5%. En revanche, vu la forte salinité des eaux, on a accepté pour la nappe superficielle une erreur d'analyse allant jusqu'à 10%.

6. Étude des résultats des analyses chimiques : Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux de sous système aquifère Ain chabro-Hammamet ont montré une grande variation des concentrations des éléments chimiques, qui dépassent les normes de potabilité dans la plupart des cas. Afin de bien comprendre les causes et le rythme de ces variations, deux représentations des données ont été réalisées :

- une représentation statistique, présentant les valeurs maximales, moyennes, minimales et les écarts types, comparés aux normes de potabilité (1), d'irrigation (2), et des eaux de surface (3) [68];
- une représentation cartographique des éléments chimiques réalisée en parallèle.

6.1. Étude statistique

6.1.1. Caractéristiques physico-chimiques des eaux (mesure *in situ*) : La plupart des points d'eau sont destinés à l'AEP, et à l'AEA. Les paramètres qu'on a pu mesurer sur le terrain sont la température, le pH, la conductivité, l'O₂. Le TDS et la salinité sont mesurés au laboratoire.

a. La température de l'eau : C'est un paramètre important pour l'étude des eaux souterraines, car elle permet de distinguer les eaux qui circulent près de la surface et les eaux profondes. Elle joue un rôle important dans l'augmentation de l'activité chimique, bactérienne, et de l'évaporation des eaux. Notons qu'elle est influencée par la période de prélèvement (matin et soir) et la profondeur de l'aquifère, ainsi que par les variations climatiques saisonnières. Les données recueillies sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2 : variation de la température pendant le suivi (2005 /2006)

Types des ressources existantes		Eaux de surface			Eaux souterraines	
		O _{Am}	O _{Av}	S	Puits de faibles profondeurs (m)	Forages de grandes profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max	13	12	13	23	18
	Min	9	9,6	12	11	10
	Moy	10,94	10,95	12,33	17,11	13,28
	Ecart Type	1,47	1,13	0,57	5,17	2,12
	Normes	< 25 (1)				

O_{Am} : Oued Bouakous Amont ; O_{Av} : Oued Bouakous Aval ; S : Source Bouakous

Les températures des eaux souterraines et superficielles (puits et forages, source) sont inférieures à la norme de potabilité. Ces valeurs nous montrent que la nappe captée est de faible à moyenne profondeur (entre 60 et 100 m au niveau des puits contrôlés). Les trois ressources en eau présentent des températures presque similaires ; les eaux de surface montrent une variation de la température entre 9 et 13°C et un écart type faible de 1,47 °C à 0,57°C, à cause de leur contact direct avec l'atmosphère d'une part, et des précipitations pendant l'hiver d'autre part.

En revanche les eaux souterraines sont moins influencées par les conditions extérieures : la température de la nappe superficielle varie entre 11 et 23°C avec un écart type de 5°C et celle de la nappe profonde varie entre 10 et 18°C avec un écart type de 2,12°C, ce qui peut s'expliquer par l'effet des formations superficielles qui contiennent des proportions importantes d'argile qui couvrent l'aquifère et l'isolent de l'influence extérieure [78,79,80,81]

b. La conductivité : La conductivité électrique est un moyen important d'investigation en hydrogéologie. La variation de la conductivité est liée étroitement aux modifications de la minéralisation des eaux souterraines et à la température de milieu. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 3 : variation de la conductivité pendant le suivi (2005 /2006)

Types des ressources existantes		Eaux de surface			Eaux souterraines	
		O _{Am}	O _{Av}	S	Puits de faibles profondeurs (m)	Forages de grandes profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max,	434	555	480	9120	2500
	Min,	276	320	442	997	468
	Moy,	367,57	423,75	456,6	2414,11	1067,62
	Ecart Type	55,71	91,383	20,43	1677,51	447,29
	Normes	< 400 (1)			< 20000 (2)	

O_{Am} : Oued Bouakous Amont ; O_{Av} : Oued Bouakous Aval ; S : Source Bouakous

Ces valeurs montrent que les eaux de surface ne dépassent pas beaucoup la norme recommandée pour les eaux d'alimentation en eau potable (AEP). La conductivité moyenne montre des valeurs admissibles (367,57 et 423,75 µS,cm⁻¹) dans l'oued Bouakous, grâce au débit important de l'oued qui augmente en fonction des précipitations. En revanche les valeurs extrêmes sont enregistrées aux

puits de faible profondeur, avec des conductivités de l'ordre de 2000 et 9120 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, dues aux apports pluvieux qui diluent les concentrations, et à l'effet de la dissolution des évaporites et des alluvions au niveau de la plaine.

La conductivité naturelle des eaux souterraines présente donc une moyenne de 1067 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pour les eaux de la nappe, et 2414 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pour les eaux des puits. Elle est due à la dissolution des formations qui constituent l'aquifère ; la valeur maximale de 9120 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pour la nappe superficielle au niveau du puits P₁₄ est ainsi due aux lentilles gypseuses qui existent au niveau des pieds de Dj Belkif à la limite NW la nappe [78,79,80,81]. Au niveau de la nappe profonde, la conductivité est de l'ordre de 2500 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

c. La minéralisation totale de l'eau : Il existe une relation étroite entre la teneur en sels dissous d'une eau et sa minéralisation. Nous avons calculé la minéralisation des eaux de la région d'étude en fonction de leurs conductivités mesurées et un facteur déterminé (Tableau 1, Annexe3) [68]. Les résultats et leurs traitements statistiques sont dans le tableau suivant :

Tableau 4 : variation de la minéralisation pendant le suivi (2005 /2006)

Types des ressources existantes		Eaux de surface			Eaux souterraines	
		O _{Am}	O _{Av}	S	Puits de faibles profondeurs (m)	Forages de grandes profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max,	310,71	397,33	343,64	6917,92	1896,36
	Min,	197,59	218,35	316,43	756,96	335,05
	Moy,	263,15	303,37	326,93	1877,35	818,40
	Ecart Type	39,88	65,42	14,63	1322,65	363,79
	Normes					

O_{Am} : Oued Bouakous Amont ; O_{Av} : Oued Bouakous Aval ; S : Source Bouakous

La classification des eaux souterraines se fait en 5 classes selon leur utilisation préférentielle [78,79,80,81] :

- eau très peu minéralisée (< 250 mg/l), utile pour la fabrication de vapeur mais ne pouvant convenir à la distribution publique sans un apport de sel dissous ;
- eau peu minéralisée (250 à 500 mg/l), utilisée par l'industrie et pouvant servir à la distribution publique d'eau potable (AEP) ;
- eau normalement minéralisée (500 mg/l à 1 g/l), correspondant aux normes des eaux potables ;
- eau non conforme aux normes de potabilité (1 à 2 g/l) mais pouvant être utilisée pour l'irrigation et pour abreuver les animaux ;
- eau très salée (>2 g/l) impropre en dehors d'un usage thermal.

Dans le cas de notre région d'étude, nous avons appliqué cette classification dont le tableau suivant résume les résultats :

Tableau 5 : Classement de la minéralisation des eaux de la nappe Ain Chabro-Hammamet (Mai 2006)

Classes (g/l)	Nombre	%
0,0 à 0,25	0	0
0,25 à 0,5	0	0
0,5 à 1,00	8	30,76
1,00 à 2	6	23,07
> 2	10	38,46
Total	26	100

Le tableau montre que près de 40% des eaux sont caractérisées par une minéralisation supérieure à 2 g/l.

d. Salinité, TDS (Total Dissolved Sels) : ces deux paramètres sont directement liés à la minéralisation des eaux. Les tableaux qui suivent présentent leurs études statistiques. Pour la

salinité, les plus fortes concentrations ont été enregistrées dans les puits de faible profondeur avec un maximum de 4g/l. Les eaux de surface sont généralement douces.

Concernant le TDS, on a remarqué les mêmes tendances d'augmentation surtout dans les eaux de la nappe superficielle avec une valeur moyenne de 2087,91 mg/l. Les eaux de surface sont caractérisées par des teneurs généralement faibles par rapport aux normes [78,79,80,81].

Tableau 6 : variation de la salinité pendant le suivi (2005 /2006)

Types des ressources existantes		Eaux de surface			Eaux souterraines	
		O _{Am}	O _{Av}	S	Puits de faibles profondeurs (m)	Forages de grandes profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max,	0	0,1	0	4	1,1
	Min,	0	0		0,3	0
	Moy,	0	0,037		1,11	0,33
	Ecart Type	0	0,05		0,93	0,27
	Normes					

Tableau 7: variation de TDS pendant le suivi (2005 /2006)

Types des ressources existantes		Eaux de surface			Eaux souterraines	
		O _{Am}	O _{Av}	S	Puits de faibles profondeurs (m)	Forages de grandes profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max,	227	300		7968	1499
	Min,	175	186		407	294
	Moy,	199,14	223,87	476	2087,91	675,65
	Ecart Type	16,74	45,014		1941,54	373,5
	Normes				1500	

O_{Am} : Oued Bouakous Amont ; O_{Av} : Oued Bouakous Aval ; S : Source Bouakous

e. Le potentiel hydrogène de l'eau (pH): La molécule d'eau est légèrement ionisée en ions H⁺ et OH⁻. Le pH d'une solution est l'inverse du logarithme de la concentration en ions H₃O⁺. Il varie en fonction de la température et de la force ionique. C'est un paramètre qui détermine l'acidité ou l'alcalinité d'une eau ainsi que l'état d'équilibre des éléments chimiques dans les diagrammes Eh-pH :

$$pH = \log (1/ [H_3O^+]) = 1 \log (1/ [H^+]) \quad (1)$$

Les résultats des mesures du pH des eaux effectuées dans la région d'étude, sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 8 : variation de pH pendant le suivi (2005 /2006)

Types des ressources existantes		Eaux de surface			Eaux souterraines	
		O _{Am}	O _{Av}	S	Puits de faibles profondeurs (m)	Forages de grandes profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max,	8,3	9,03	8,15	8,44	8,33
	Min,	6,72	6,18	7,26	7,01	7,18
	Moy,	7,62	7,65	7,83	7,42	7,48
	Ecart Type	0,61	1,17	0,47	0,36	0,28
	Normes	6,5 < pH < 9,5 (1)				

O_{Am} : Oued Bouakous Amont ; O_{Av} : Oued Bouakous Aval ; S : Source Bouakous

Ces données montrent que, tous les points d'eau se trouvent dans l'intervalle de la norme de potabilité mais avec des valeurs variables [78,79,80,81] :

- pour les eaux superficielles, au niveau de l'oued Bouakous (amont et aval), le pH varie entre 6,18 et 9,03, ce qui est dû au contact direct des eaux avec des rejets acides ou alcalins déversés dans l'oued ;

- pour les eaux souterraines (eaux superficielles et profondes), les valeurs du pH varient de 7,01 à 8,44, à cause de la couverture alluvionnaire (sableuse et argileuse) qui isole la nappe de l'air.

f. Oxygène dissous (O₂) : La quantité d'oxygène en solution dans une eau régit les réactions d'oxydoréduction et présente une évolution identique à celle du Eh. Les différentes concentrations observées sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 9: variation de (O₂) pendant le suivi (2005 /2006)

Types des ressources existantes		Eaux de surface			Eaux souterraines	
		O _{Am}	O _{Av}	S	Puits de faibles profondeurs (m)	Forages de grandes profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max,	8,15	7,65	8,23	8,72	8,47
	Min,	7,47	7,37	5,71	1,69	1,76
	Moy,	7,86	7,51	7,32	5,33	5,93
	Ecart Type	0,23	0,10	1,49	2,15	2,27
	Normes	(1)				

O_{Am} : Oued Bouakous Amont ; O_{Av} : Oued Bouakous Aval ; S : Source Bouakous

Les teneurs les plus élevées sont observées au niveau des eaux de surface de l'oued Bouakous (amont et aval) avec une moyenne de 7,86 mg.l⁻¹, indiquant par conséquent, un état naturel des eaux sub-saturé en oxygène.

Les valeurs les plus basses sont présentées au niveau de la nappe (superficielle et profonde) avec une moyenne de 1,76 mg.l⁻¹, ce qui est dû à l'effet des formations sous jacentes qui font diminuer les teneurs en O₂.

En revanche, dans la nappe superficielle, les teneurs sont importantes dans les endroits où l'aquifère est constitué par des formations perméables. A l'inverse, dans les endroits où il y a une couverture argileuse, on observe une diminution des teneurs en oxygène [78,79,80,81].

6.1.2. Sels dissous : La présence de ces sels est le résultat de phénomènes exogènes qui ont contribué à des modifications de la chimie des eaux (évaporation, lessivage et dilution) :

6.1.2.1. Les éléments majeurs

a. Calcium (Ca⁺²) : La présence d'ions Ca⁺² dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles, à savoir la dissolution des formations carbonatées (CaCO₃) et la dissolution des formations gypseuses (CaSO₄), selon les réactions suivantes :



Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 10 : variation des teneurs en calcium pendant le suivi (2005 /2006)

Types des ressources existantes		Eaux de surface			Eaux souterraines	
		O _{Am}	O _{Av}	S	Puits de faibles profondeurs (m)	Forages de grandes profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max,	77,02	108,90	77,02	510,8	178,19
	Min,	41,21	57,01	73,64	47,92	37,14
	Moy,	67,50	72,00	75,48	172,78	93,38
	Ecart Type	12,03	16,21	1,71	111,86	30,87
	Normes	100 (1)				

O_{Am} : Oued Bouakous Amont ; O_{Av} : Oued Bouakous Aval ; S : Source Bouakous

Ces résultats montrent que la plupart des points d'eau dans la plaine présentent des concentrations maximales supérieures à la norme de potabilité des eaux. Les moyennes dépassent les normes dans les puits sauf au niveau de l'oued (O_{Am}, O_{Av}, S) dans lequel les concentrations sont plus faibles, ce qui indique que ces eaux sont moins influencées par la dissolution des formations carbonatées et gypseuses. Les valeurs les plus élevées sont observées au niveau de la nappe superficielle (510,8

mg.l⁻¹), à cause de la dissolution des lentilles gypseuses existant dans le réservoir aquifère, ce qui entraîne une grande variation des concentrations (écart type de 111,86 mg.l⁻¹).

En revanche, au niveau des eaux de surface, les teneurs en Ca²⁺ sont plus faibles à cause de la forte dilution des ions par les apports de l'oued. Les concentrations moyennes dans l'oued bouakous sont de 75,48 mg.l⁻¹ [78,79,80,81]

b. Magnésium (Mg⁺²) : Ses origines sont comparables à celle du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomite), selon les réactions :



Les concentrations observées au niveau de la plaine sont présentées dans le tableau 11:

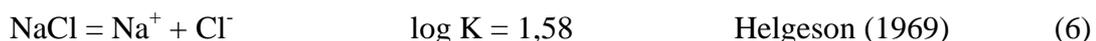
Tableau 11: variation des teneurs en Magnésium pendant le suivi (2005 /2006)

Types des ressources existantes		Eaux de surface			Eaux souterraines	
		O _{Am}	O _{Av}	S	Puits de faibles profondeurs (m)	Forages de grandes profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max,	4,47	4,15	9,76	491,38	68,49
	Min,	1,77	3,17	3,32	29,81	6,76
	Moy,	3,15	3,62	7,33	107,62	26,77
	Ecart Type	0,84	0,32	3,51	132,78	12,47
Normes		50(1)				

O_{Am} : Oued Bouakous Amont ; O_{Av} : Oued Bouakous Aval ; S : Source Bouakous

L'évolution des teneurs est identique à celle du calcium, avec des teneurs plus élevées observées au niveau de la nappe superficielle (491,38mg.l⁻¹), les valeurs plus faibles observées au niveau des eaux de surface de l'oued en amont et en aval, ainsi que dans les eaux de source avec une moyenne entre 3,15 mg/l et 7,33 mg/l. La comparaison des concentrations avec les normes de potabilité montre qu'une grande partie des points d'eau possède des teneurs inférieures à la limite de potabilité, sauf dans le cas de la nappe superficielle où la moyenne dépasse 50 mg.l⁻¹ [78,79,80,81]

c. Chlorure (Cl⁻) et sodium (Na⁺) : L'origine de ces deux éléments est liée principalement à la dissolution des formations salifères. La dissolution des minéraux salifères se fait selon la relation suivante :



Les concentrations enregistrées sont données dans le tableau suivant :

Tableau 12 : variation des teneurs en sodium (Na⁺) pendant le suivi (2005 /2006)

Types des ressources existantes		Eaux de surface			Eaux souterraines	
		O _{Am}	O _{Av}	S	Puits de faibles profondeurs (m)	Forages de grandes profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max,	8,32	9,42	10,62	600	500
	Min,	3,24	6,42	6,69	65,99	12,155
	Moy,	6,14	7,44	9,12	482,42	182,55
	Ecart Type	1,57	1,10	2,12	103,41	209,68
Normes		150 (1)				

Tableau 13: variation des teneurs des chlorures (Cl⁻) pendant le suivi (2005 /2006)

Types des ressources existantes		Eaux de surface			Eaux souterraines	
		O _{Am}	O _{Av}	S	Puits de faibles profondeurs (m)	Forages de grandes profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max,	20,77	16,94	17,41	2202,69	228,25
	Min,	11,89	11,76	11,8	75,74	7,28
	Moy,	14,99	14,88	15,26	344,77	90,43
	Ecart Type	2,86	1,95	3,03	386,01	57,57
Normes		200 (1)				

O_{Am} : Oued Bouakous Amont ; O_{Av} : Oued Bouakous Aval ; S : Source Bouakous

Dans les eaux de l'oued Bouakous (amont, aval, et source), les teneurs de ces deux éléments sont très faibles et les moyennes n'ont pas dépassé les normes ; par contre, dans les puits qui captent la nappe superficielle les teneurs sont très variables (écart type : 482,42 mg.l⁻¹ pour le sodium et 344,77 mg.l⁻¹ pour les chlorures), ce qui est dû à la dissolution rapide des formations évaporitiques riches en halite. Dans les forages qui captent la nappe profonde, les teneurs augmentent dans la partie centrale de la plaine.

Les teneurs en chlorures sont très corrélées à celles du sodium (r = 0,98), ce qui confirme le même origine salifère de ces deux éléments. Les teneurs du sodium et du chlorure présentent en général des valeurs supérieures aux normes de potabilité avec une moyenne de 344,77mg.l⁻¹ pour les chlorures et 482,42mg.l⁻¹ pour le sodium, indiquant donc, l'existence de forts apports salifères à partir des formations évaporitiques[78,79,80,81]

d. Potassium (K⁺) : Le potassium provient généralement de l'altération des formations silicatées (gneiss, schiste), des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques (NPK).

Tableau 14: variation des teneurs du potassium (K⁺) pendant le suivi (2005 /2006)

Types des ressources existantes		Eaux de surface			Eaux souterraines	
		O _{Am}	O _{Av}	S	Puits de faibles profondeurs (m)	Forages de grandes profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max,	1,36	6,38	1,29	7,75	6,60
	Min,	0,79	0,98	0,56	0,25	0,5
	Moy,	1,10	2,32	0,82	2,63	2,17
	Ecart Type	0,18	1,71	0,41	2,11	1,86
	Normes	12(1)				

O_{Am} : Oued Bouakous Amont ; O_{Av} : Oued Bouakous Aval ; S : Source Bouakous

Les résultats montrent que la plupart des points ont des concentrations inférieures à la limite de potabilité. On peut constater que cet élément participe moins à la minéralisation des eaux [78,79,80,81]

e.Sulfates (SO₄²⁻) : La présence d'ions sulfatés dans l'eau est liée à la dissolution des formations gypseuses selon la relation :



Les concentrations observées sont indiquées dans le tableau suivant :

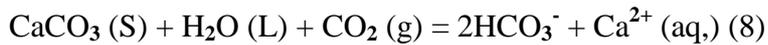
Tableau 15: variation des teneurs des sulfates (SO₄²⁻) pendant le suivi (2005 /2006)

Types des ressources existantes		Eaux de surface			Eaux souterraines	
		O _{Am}	O _{Av}	S	Puits de faibles profondeurs (m)	Forages de grandes profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max,	39,81	44,42	35,46	2427,96	670,38
	Min,	18,67	21,30	24,27	138,2	55,9
	Moy,	27,13	27,39	31,12	446,10	201,52
	Ecart Type	6,61	7,21	6,00	377,29	155,46
	Normes	250 (1)			500(3)	

O_{Am} : Oued Bouakous Amont ; O_{Av} : Oued Bouakous Aval ; S : Source Bouakous

Les concentrations observées au niveau de l'oued et de la source montrent des teneurs inférieures aux normes des eaux superficielles. Pour les eaux souterraines, en revanche, certains points ont des concentrations très supérieures à la norme (2427,96 mg.l⁻¹), bien que les moyennes restent toujours inférieures à la norme de potabilité. La forte concentration de cet élément dans la nappe superficielle est liée très probablement à la dissolution des formations triasiques existantes au pied de Dj. Belkif (lentilles gypseuses). Les teneurs au niveau des forages sont moins élevées indiquant l'éloignement de la nappe par rapport aux formations gypseuses [78,79,80,81]

f.Bicarbonates (HCO₃⁻) : La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées (calcaires) par des eaux chargées en gaz carbonique. La somme des équations de dissolution conduit à la relation suivante :



Les concentrations observées au niveau de la plaine sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 16: variation des teneurs des Bicarbonates (HCO_3^-) (2005 /2006)

Types des ressources existantes		Eaux de surface			Eaux souterraines	
		O _{Am}	O _{Av}	S	Puits de faibles profondeurs (m)	Forages de grandes profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max,	170	223	454,98	740,54	418,42
	Min,	120	140	242,78	130,42	207,4
	Moy,	146	170	316,76	364,07	312,01
	Ecart Type	19,88	28,12	119,8	119,85	60,34
	Normes	250			350	

O_{Am} : Oued Bouakous Amont ; O_{Av} : Oued Bouakous Aval ; S : Source Bouakous

Les valeurs moyennes calculées sont proches des valeurs naturelles, cependant des variations importantes sont enregistrées, ce qui indique une hétérogénéité des origines des bicarbonates surtout au niveau de la source (l'écart type est de 119,8 mg.l⁻¹) et dans la nappe superficielle captée par les puits (l'écart type est de 119,85 mg.l⁻¹).

La présence de cet élément dans les eaux est liée à la dissolution des formations calcaires existantes aux bordures de la région d'étude. Pour les eaux souterraines, la forte présence des bicarbonates est due principalement aux apports souterrains sortant des bordures SW de la région [78,79,80,81]

g. Nitrates NO₃⁻ : L'azote est présent sous trois formes chimiques qui sont, le nitrate, le nitrite et l'ammonium. Nous n'avons pu déterminer que les nitrates au niveau de la plaine. La concentration des nitrites a été obtenue sur quelques points. L'analyse statistique des données est présentée dans le tableau suivant :

Tableau 17: variation des teneurs des Nitrates (NO₃⁻) pendant le suivi (2005 /2006)

Types des ressources existantes		Eaux de surface			Eaux souterraines	
		O _{Am}	O _{Av}	S	Puits de faibles profondeurs (m)	Forages de grandes profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max,	50,63	17,31	27,45	117,97	62,47
	Min,	8,46	10,52	16,37	1,51	4,26
	Moy,	24,24	13,72	23,03	38,67	28,87
	Ecart Type	13,88	1,99	5,87	25,66	16,89
	Normes	50(1)			100(2)	

O_{Am} : Oued Bouakous Amont ; O_{Av} : Oued Bouakous Aval ; S : Source Bouakous

Les nitrates représentent la forme la plus oxygénée de l'azote, qui est très soluble. Sa présence dans les eaux souterraines est liée à l'utilisation intensive des engrais chimiques. Les teneurs maximales sont observées au niveau des puits qui captent la nappe superficielle (117,97 mg.l⁻¹ au puits P₂). Au niveau des eaux de surface et la nappe profonde, les concentrations sont moins élevées. Les concentrations moyennes au niveau de l'oued sont inférieures aux normes des eaux de surface. Au niveau des eaux souterraines, seules les eaux de la nappe superficielle présentent des teneurs variables avec un écart type de 25,66 mg.l⁻¹ [78,79,80,81]

h. Les nitrites NO₂⁻ (ou azote nitreux) : représentent une forme moins oxygénée et moins stable. Cette forme représente la forme de passage entre les nitrates et l'ammonium, et elle est toxique. Les valeurs moyennes les plus élevées sont observées au niveau de l'oued Bouakous (0,048 mg.l⁻¹). Elles sont dues à l'effet de l'oxydation de la forme ammoniacal. Au niveau des eaux souterraines les teneurs sont importantes (0,058 mg.l⁻¹) dans quelques points d'eau observés, et cette forme est liée à la réduction de la forme du nitrate. Dans l'ensemble de la plaine, les valeurs sont inférieures à la norme [78,79,80,81].

i. L'ammonium (NH_4^+) résulte de la décomposition des matières organiques sous forme de radicaux NH_2 qui conduit à la formation de NH_4^+ . C'est la forme d'azote la plus toxique. Sa présence en taux élevée indique une pollution récente, et les teneurs faibles indiquent une pollution ancienne. Il est lié soit aux rejets urbains et industriels dans les oueds qui donnent des concentrations élevées, soit à la réduction des formes azotées (nitrates et nitrites) en proportions réduites.

Lors des études antérieures menées sur la région d'étude, les teneurs maximales enregistrées ne dépassaient pas 0,04mg/l [10,35]. Les concentrations observées sont dans l'ensemble inférieures à la norme de potabilité pour les eaux souterraines et pour les eaux de l'oued Bouakous.

Le transfert naturel de l'azote dans les eaux fait intervenir l'oxydoréduction et les réactions biologiques suivantes (Fig.1). Le transfert de la forme ammonium vers les nitrites et les nitrates se fait par oxydation.

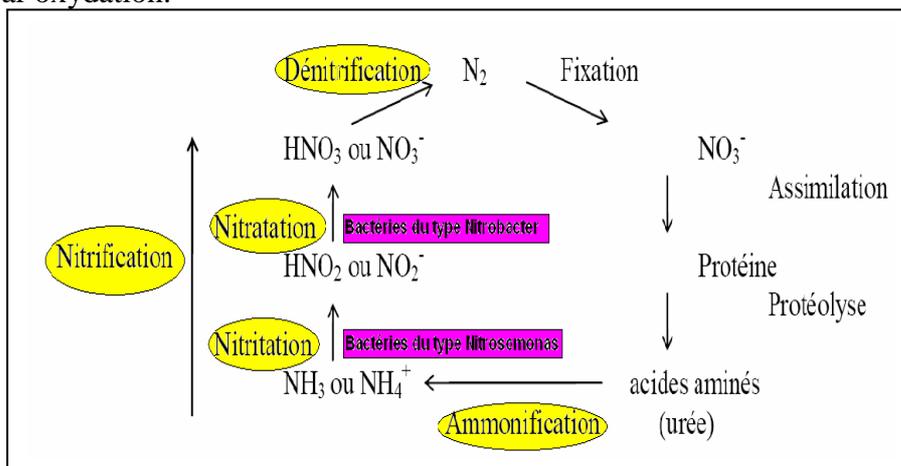


Figure 1: cycle de l'azote [23]

Cette réaction est rapide en présence d'oxygène ; la forte teneur en CO_2 associée à une faible teneur en oxygène accroît la concentration en ammonium dans l'eau.

6.1.2.2.Éléments mineurs naturels

a. Silicium (Si) : La silice dans la nature se trouve sous la forme de SiO_2 . Elle est d'origine essentiellement naturelle, liée aux formations silicatées (argiles, formations métamorphiques) ou d'origine industrielle, liée à l'industrie du verre, du mica, de la porcelaine et du ciment.

Dans les eaux naturelles, on le retrouve sous une forme soluble (ionique) et colloïdale. Les concentrations observées au niveau de la plaine sont reportées dans le tableau suivant [78,79,80,81] :

Tableau 18 : variation des teneurs du Silicium (Si^{+2}) pendant le suivi (2005 /2006)

Types des ressources existantes		Eaux de surface			Eaux souterraines	
		O_{Am}	O_{Av}	S	Puits de faibles profondeurs (m)	Forages de grandes profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max,	-	-	-	10,17	9,66
	Min,	-	-	-	0,14	3,84
	Moy,	-	-	-	6,37	6,42
	Ecart Type	-	-	-	3,62	1,76
	Normes	<1,4(1)			3(3)	

O_{Am} : Oued Bouakous Amont ; O_{Av} : Oued Bouakous Aval ; S : Source Bouakous

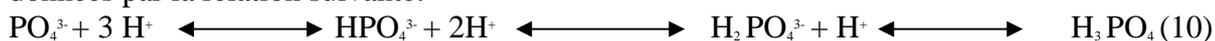
Les concentrations les plus élevées sont observées dans les puits qui captent la nappe superficielle. Ainsi un pic de 10,17 mg.l^{-1} a été observé au niveau des puits P₉, P₁₁, et P₁₂. Les concentrations sont

moins importantes au niveau des eaux de la source (3,65 mg.l⁻¹ en Mai 2006, et 3,83 mg.l⁻¹ en septembre 2006), en raison de son origine carbonatée (calcaires aux bordures SW de la nappe).

L'évolution saisonnière de la silice est marquée par une augmentation des concentrations pendant la période des hautes eaux, due au lessivage des formations alluvionnaires riches en sable fin et moyen et des grès. Les valeurs moyennes dépassent les valeurs naturelles et les valeurs préconisées par les normes (6,37 mg/l et 6,42 mg/l) indiquant la forte présence de la silice dans ces deux ressources en eau.

c. Fluorure (F⁻) : Le fluor n'existe pas à l'état libre mais sous forme de fluorures en association avec d'autres éléments qui sont: le fluorure de calcium (CaF₂), la cryolite (Na₃AlF₆) et le fluor apatite (Ca₅PO₄3F). Le fluor et ses dérivés sont largement employés dans l'industrie (traitement de surface, industrie du verre et de la céramique). Les valeurs obtenues sont inférieures au seuil de détection de l'appareil, donc considérées comme nulles, et ce pour tous les points d'eau (puits et forages). L'absence de fluorure peut être lié à l'activité industrielle qui est faible, voire inexistante, dans la zone d'étude [78,79,80,81]

d. Phosphate (PO₄³⁻) : Le phosphate peut se trouver sous différentes formes oxydées, méta HPO₃, pyro H₄P₂O₇ et ortho H₃PO₄. En milieu aqueux, les formes méta et pyro tendent vers la forme ortho pour des pH de 5 à 8. Les réactions chimiques entre les différentes formes de phosphate sont données par la relation suivante:



Les phosphates peuvent provenir de l'épandage des engrais chimiques, à bases de phosphates, sur les terrains agricoles, comme ils peuvent provenir du lessivage des terrains traversés par les eaux souterraines (origine lithologique).

La détermination de ce paramètre a été faite au laboratoire, mais les valeurs obtenues sont toutes en dessous du seuil de détection de l'appareil. Par conséquent, on a estimé que cet élément est inexistant dans les eaux analysées ; des études antérieures menées dans la région d'étude rapportent des valeurs maximales enregistrées entre 0,01 mg/l et 0,16mg/l [35,78,79,80,81].

6.1.2.3.Éléments métalliques en traces

a. Fer (Fe (T)) et Manganèse (Mn²⁺) : Ces deux éléments chimiques se rencontrent souvent ensemble dans la nature. La présence de fer dans l'eau peut avoir diverses origines : elle peut être naturelle, par le lessivage des terrains argileux, ou industrielle (métallurgiques, sidérurgiques)[23]. La présence du manganèse, du point de vue industriel, est liée à la métallurgie, à l'industrie électrique et à l'industrie chimique. Dans les eaux bien aérées, les concentrations de ces deux éléments sont souvent faibles, mais dans les eaux peu aérées (nappe captive), on observe de fortes concentrations. Le manganèse peut apparaître dans l'eau à un potentiel redox plus élevé que celui du fer. Les concentrations observées sont données dans le tableau 19,20 [78,79,80,81] :

Tableau 19 : variation des teneurs du Fer pendant le suivi (2005 /2006)

Types des ressources existantes		Eaux de surface			Eaux souterraines	
		O _{Am}	O _{Av}	S	Puits de faibles profondeurs (m)	Forages de grandes profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max,	0,61	0,79	0,61	1,31	0,68
	Min,	0,32	0,43	0,23	0,32	0,23
	Moy,	0,53	0,53	0,36	0,73	0,40
	Ecart Type	0,18	0,11	0,21	0,28	0,10
Normes		0,2(1)			1,5 (3)	

Tableau 20 : Variation des teneurs du Manganèse pendant le suivi (2005 /2006)

Types des ressources existantes		Eaux de surface			Eaux souterraines	
		O _{Am}	O _{Av}	S	Puits de faibles profondeurs (m)	Forages de grandes profondeurs (m)
Paramètres statistiques	Max,	1,02	9,32	0,56	0,037	0,037
	Min,	0,02	0,01	0,00006	0,00033	0,0002
	Moy,	0,43	1,50	0,18	0,016	0,0087
	Ecart Type	0,39	3,22	0,32	0,016	0,0127
	Normes	0,05(1)		0,25 (3)		

O_{Am} : Oued Bouakous Amont ; O_{Av} : Oued Bouakous Aval ; S : Source Bouakous

Les concentrations les plus élevées sont observées au niveau des eaux de surface dans la partie aval de l'oued avec des concentrations qui atteignent 0,79mg/l pour le fer et 9,32 mg/l pour le manganèse. Les moyennes des concentrations du fer et du manganèse dans la plaine sont supérieures aux teneurs indiquées par les normes de potabilité pour les eaux de surface qui circulent au niveau de l'oued Bouakous en aval, indiquant la pollution des eaux. Sa présence dans l'eau de l'oued est liée fort possible aux rejets industriels (voir photos P)

Des teneurs élevées en fer ont été observée au niveau de la nappe en divers points d'eau, notamment au puits P₂₆ (1,31mg/l), P₁, P₂₀, et P₂₇, situés au centre de la plaine, avec des concentrations allant de 0,70 à 1,1 mg/l. La présence de ces éléments est liée au débit réduit des eaux qui favorise la libération de ces deux éléments [23]. Leur origine est liée à la nature du produit métallique qui est utilisé comme une couverture pour le puits et au débit réduit de l'eau, dans le cas de l'existence d'une couverture argileuse. Les concentrations moyennes des eaux souterraines en fer et en manganèse sont inférieures à la norme de potabilité [78,79,80,81]

6.2. Faciès chimiques des eaux : Le tableau suivant récapitule l'ensemble des faciès chimiques déterminés durant les deux périodes d'observation :

Tableau 21: Classement des faciès chimiques des eaux de la région d'étude.

Période d'analyse	Mois	Chloruré Sulfaté sodique (%)	Sulfaté chloruré calcique (%)	Bicarbonaté Sodique (%)	Bicarbonaté Calcique (%)
Période Hautes Eaux	Mai 2005	50	22	22	5
	Nov, 2005	20	60		20
Périodes Basses Eaux	Mai 2006	40	27	7	27
	Sep,2006	11	56		33

La représentation des données physico-chimiques sur le diagramme de Piper montre plusieurs faciès chimiques qui dépendent de la nature géologique de l'aquifère, des activités agricoles et des pollutions urbaines et industrielles de surface.

6.2.1. Les eaux superficielles (Source Bouakous, O_{aval}, O_{amont}) : Le diagramme de Piper (fig.2,3) montre un seul faciès dominant pour l'ensemble de points, qui est, le bicarbonaté calcique. Ce faciès indique une dissolution carbonatée riche en calcium et en bicarbonates, ce qui prouve l'alimentation de l'oued par les eaux de la source qui draine la nappe karstique aux bordures SW de la nappe alluviale de Tébessa Hammamet [78,79,80,81].

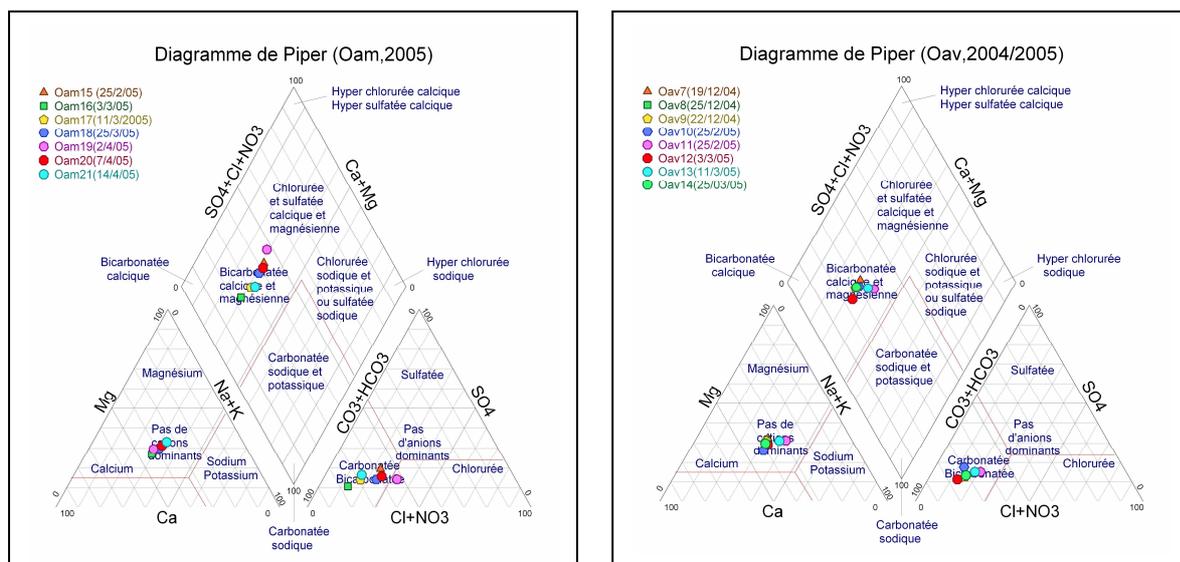


Figure 2. Diagramme de Piper des eaux de surface (O_{am}, O_{av} , 2004/2005)

6.2.2. Les eaux souterraines (Puits et Forages) : Le report des résultats issus des puits sur le diagramme de Piper montre une variabilité du faciès chimique des eaux, qui sont positionnés entre trois pôles (Tableau 29 ; fig.3,4) [78,79,80,81] :

- le pôle salifère qui se caractérise par un faciès chloruré sodique, surtout dans les puits P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , P_{26} , P_{27} , qui sont positionnés dans la partie Est et Nord Est de la plaine. Ce pôle est sûrement dû à l'existence des lentilles évaporitiques ;
- le pôle des carbonates représenté par un faciès bicarbonaté calcique, dû à la dissolution des calcaires des bordures SW et NE de la plaine. Les points caractéristiques de ce pôle sont les puits P_{16} , P_6 , F_{S4-5} bis, et F_1 . Ces points se positionnent près des bordures carbonatées au niveau de la zone de Ain chabro-Hammamet;
- le pôle gypseux, caractérisé par des eaux sulfatées calciques, représenté seulement dans les puits P_{19} , P_{13} , P_{11} , P_7 , P_{12} , et P_{18} (campagne de mai 2006), situés dans la partie NE de la nappe et positionnés près des monts de Dj Belkif là où se trouvent des affleurements gypsifères triasiques.

Les triangles des cations et anions nous indique qu'il n'y a pas de cations ou d'anions dominants et représente ainsi des mélanges. Sur les quatre périodes d'observation nous avons remarqué que la majorité des points présentent les mêmes faciès chimiques (chloruré calcique et chloruré sodique, voir tableau 29). Cette répartition est remarquable sur toute la plaine. Le faciès chloruré calcique est d'origine géologique (formations alluvionnaires), alors que l'apparition des faciès chloruré sodique en pourcentage important par rapport aux autres faciès ne peut s'expliquer que par le phénomène d'échange de base où d'enrichissement des eaux en sodium se domine avec un remplacement du calcium. Le faciès bicarbonaté calcique provient des calcaires Mæstrichtien qui bordent la plaine dans sa partie SW prouvant ainsi l'alimentation naturelle de la nappe [78,79,80,81].

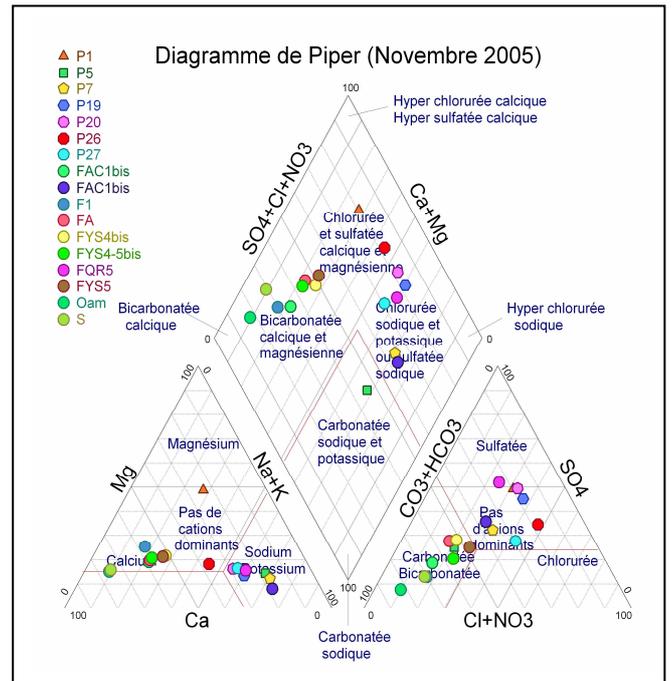
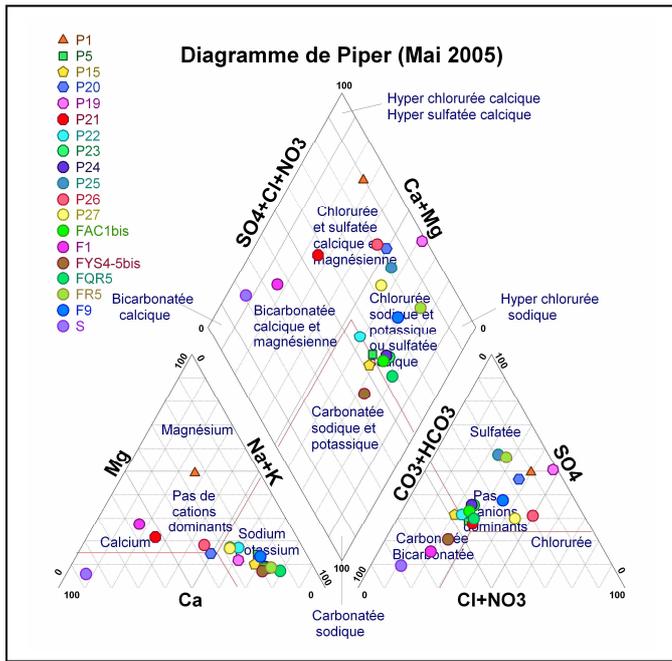


Figure 3. Diagramme de Piper des eaux souterraines (Mai, Nov.2005) [78,79,80,81]

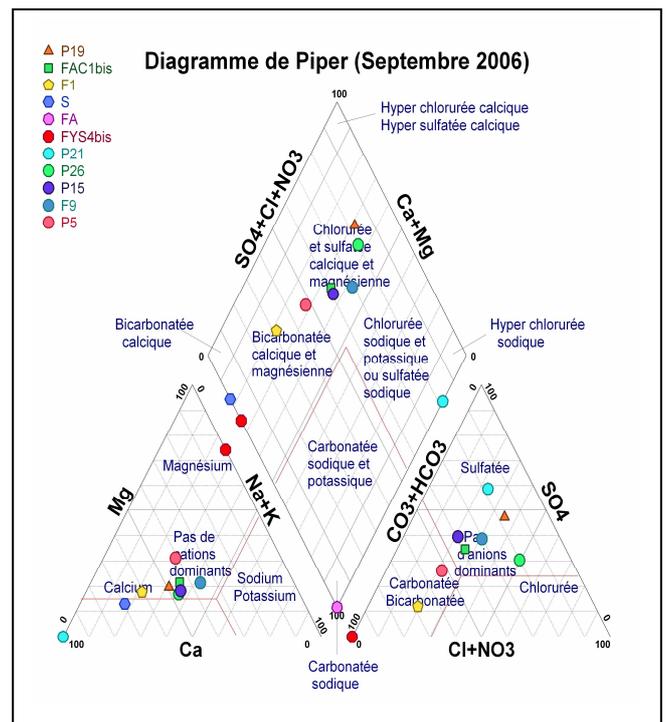
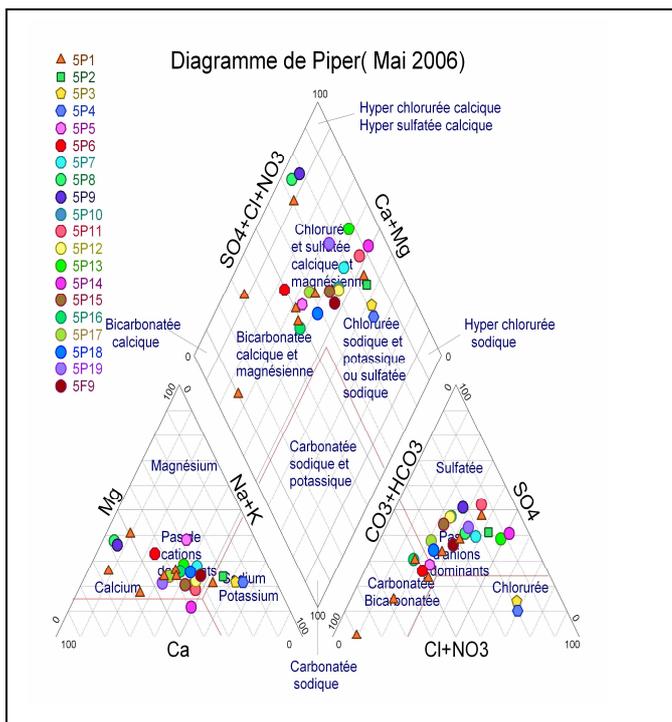


Figure 4. Diagramme de Piper des eaux souterraines (Mai, Sept.2006) [78,79,80,81]

L'influence des formations géologiques sur la nature des faciès est nettement visible : les calcaires des bordures ont donné le faciès bicarbonaté confirmant ainsi l'alimentation latérale de la nappe. Les argiles et les marnes du quaternaire ainsi que les évaporites du trias ont donné les faciès sulfaté et chloruré et ce par lessivage et par évaporation. La piézométrie favorise la naissance de ces faciès car les eaux souterraines s'écoulent suivant une direction secondaire Est-ouest et se chargent progressivement au fur et à mesure qu'on se déplace vers le centre de la plaine qui constitue une zone d'accumulation. Ceci explique les fortes concentrations observées dans ce secteur qui

engendrent la prédominance des faciès chlorurés sodique et calcique. La présence des argiles favorise des échanges de base ce qui explique la présence du sodium et du calcium [78,79,80,81]

6.3. Traitement statistique des données physico-chimiques : Les mécanismes d'acquisition des éléments chimiques avec des concentrations variables dépendent beaucoup des facteurs climatiques dominants dans la région d'étude (évaporation, précipitations), ainsi que de la nature lithologique des terrains traversés (géologie). Nous avons tenté d'utiliser la méthode d'analyse en composantes principales (ACP).

Dans cette étude, plusieurs analyses ont été effectuées sur les 4 campagnes d'échantillonnage (2005/2006) dans l'objectif, d'une part, de mieux comprendre le mécanisme d'évolution des éléments chimico-physiques existants dans l'eau, et d'autre part de faire ressortir les différents points d'eau qui possèdent des concentrations élevées par rapport à l'ensemble de la plaine, ce qui nous permet, par la suite, de donner une idée préalable sur les éléments et les sites favorables à la pollution[78,79,80,81]

6.3.1. Analyse en Composante Principale (ACP) : Cette étude a été effectuée sur l'ensemble des données de la période de mai à novembre 2005, où presque tous les éléments chimiques sont analysés. Cette étude a pris en compte l'ensemble des points d'eau. La variabilité des différents paramètres est assez hétérogène.

Les paramètres physicochimiques présentant la plus grande variabilité se composent de deux groupes, le premier est constitué par les paramètres de salinité (Cl, TDS, minéralité, etc ...), le second par un certain nombre d'éléments mineurs métalliques (Mn, Zn, Pb, Al, Cr, etc...). Un second ensemble de paramètres présente une variabilité intermédiaire ; il s'agit d'éléments mineurs métaux (Sr, etc...). La variabilité des autres éléments est faible.

La distribution des inerties montre un axe principal à 41% de variance, ce qui est remarquable ; ce processus est donc un processus dominant. Viennent ensuite deux autres sources de variabilité d'égale importance (respectivement 13 et 12% de la variance).

Les autres axes factoriels ne présentent que des pourcentages inférieurs à 10% [19,78,79,80,81] :

- **Le premier axe factoriel** oppose les éléments mineurs tels que Ba, Mn, K, O₂, Zn et pH aux éléments majeurs solubles CE, salinité, TDS, et Mg. Les éléments majeurs peu solubles dans un environnement à alcalinité résiduelle calcite négative (comme HCO₃⁻) sont en position intermédiaire. Ce premier axe est assez fréquent en hydrochimie méditerranéenne et tropicale. Il s'agit de la salinité. Il traduit la variation de composition chimique lorsque les eaux se salinisent, c'est-à-dire lorsque leur minéralité augmente ;
- **Le second axe factoriel** oppose l'oxygène et le pH au nitrate et au potassium (ainsi que certains métaux). Cet axe est un axe d'aération, mais aussi un axe représentant probablement l'activité agricole (corrélation positive K/NO₃ c'est-à-dire fertilisation). Les eaux aérées sont habituellement pauvres en CO₂ d'où un pH élevé (corrélation positive entre O₂ et pH sur cet axe factoriel). La position du nitrate ne peut s'expliquer ici par le processus de dénitrification, puisque la corrélation négative nitrate/O₂ est incompatible avec ce processus. Il convient d'intégrer les aspects agricoles (Figure 5)

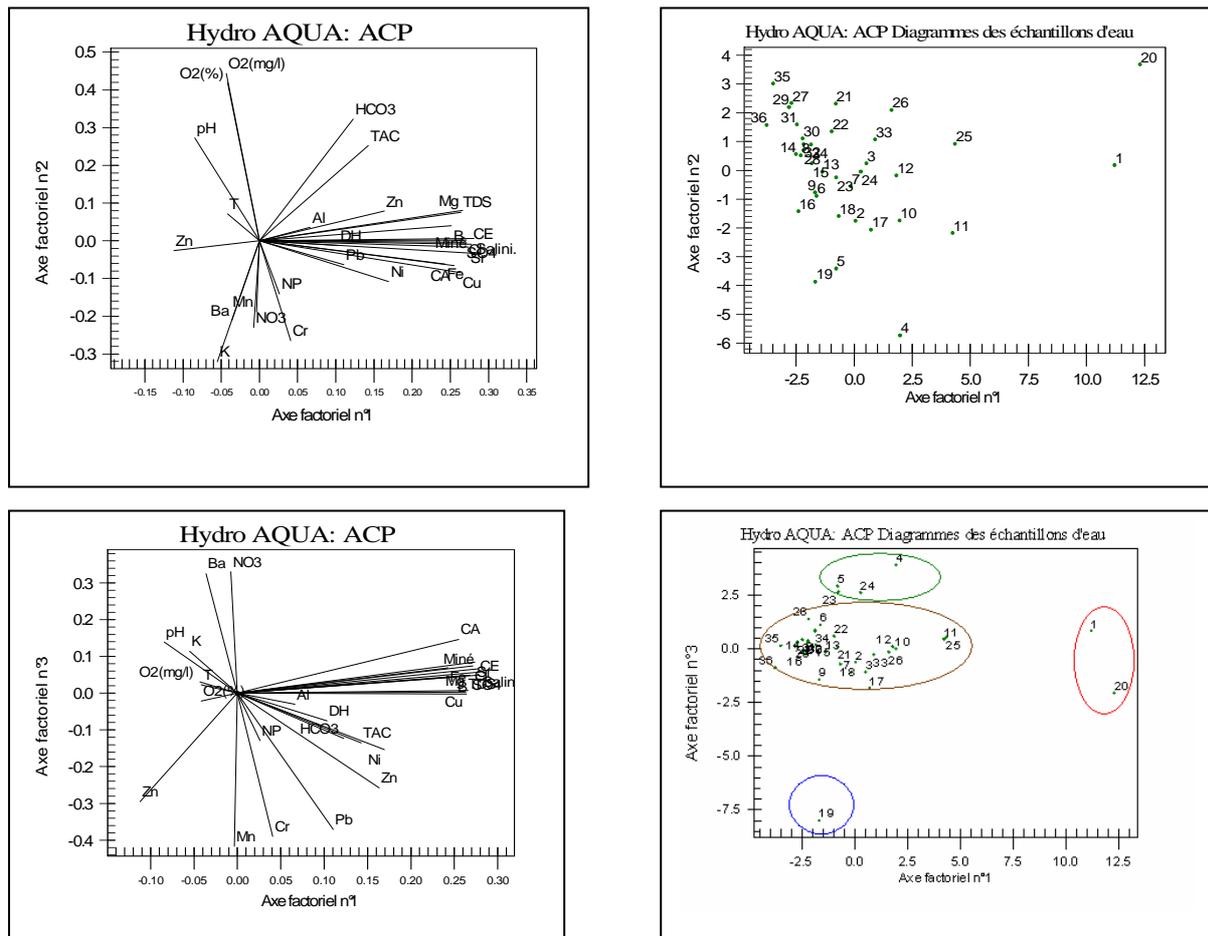


Figure 5. : Analyse en Composante Principale (ACP) [78,79,80,81]

6.4. Cartographie des principaux éléments chimiques

6.4.1. Paramètres physico-chimiques

a. Carte de conductivité : L'analyse des cartes (Fig. 6) montre que la conductivité des eaux est toujours très élevée dans la partie centrale de la plaine, et ce, quelque soit la période de prélèvement (hautes ou basses eaux). Plus on s'éloigne du centre vers la partie ouest et aux bordures calcaires plus la conductivité devient faible, indiquant ainsi la dilution des eaux de la nappe par les eaux provenant des bordures (alimentation naturelle). Cet apport d'eau douce influe sur la qualité et la minéralisation des eaux et rend la conductivité plus faible qu'au centre de la plaine [1,19,78,79,80,81]

b. Carte de salinité et TDS : La salinité des eaux est un paramètre fortement lié aux sels dissous et à leur concentration. Selon les cartes établies dans des différentes périodes de l'année (Fig. 7, Annexe3), on a constaté que la salinité est forte au centre de la plaine. Celle-ci se corrèle bien avec la conductivité et la minéralisation des eaux. La région de Hammamet présente des valeurs de salinité faibles. Cela peut s'expliquer par l'effet des eaux douces provenant des bordures sud ouest de la région. Les teneurs élevées au centre de la plaine et dans sa partie nord ouest sont le résultat d'un lessivage des formations alluvionnaires et évaporitiques affleurants en surface [1,19,78,79,80,81]

Le TDS exprime le contenu en sels d'une eau. Il est bien corrélé à la conductivité, à la salinité, et à la minéralisation. L'analyse des cartes établies présente une teneur très élevée en TDS dans le centre et le nord est de la plaine. On enregistre en revanche des valeurs faibles dans la partie ouest de la région (Hammamet), ce qui peut s'expliquer par l'effet de la dilution des eaux de la nappe par les eaux d'alimentation provenant des bordures sud ouest.

c. Carte de PH : Les cartes établies (Fig. 8) montrent que le pH des eaux souterraines (puits, forages) est de l'ordre de 7 à 7,5. Dans la période de mai 2006, le pH est plutôt basique ou alcalin (7,7 à 8,3) autour de la zone de Ain chabro et Hammamet, ce qui peut s'expliquer par l'effet des infiltrations d'eau à partir de l'oued (relation oued nappe en période hautes eaux) puisque les eaux d'infiltration, bien oxygénées, font changer le pH des eaux au niveau de la nappe ; cette oxygénation est due au contact direct avec l'air ou à une eau bien aérée [1,19,78,79,80,81]

d. Carte d'Oxygène dissous (O₂) : (Fig. 9) il varie entre 5 et 7 mg/l, dans toute la région. Au niveau de la zone de Ain chabro, et au centre de la plaine, les concentrations en oxygène dissous ont atteint des valeurs faibles, ce qui est dû aux faibles apports d'eau pendant la période de Mai 2005, ce qui permet aux micro-organismes à se développer dans l'eau, surtout dans les puits de faibles profondeurs. Les concentrations faibles en oxygène dissous indiquent la présence des micro-organismes vivants aérobies qui consomment l'O₂, donc c'est un indice de pollution [1,19,78,79,80,81]

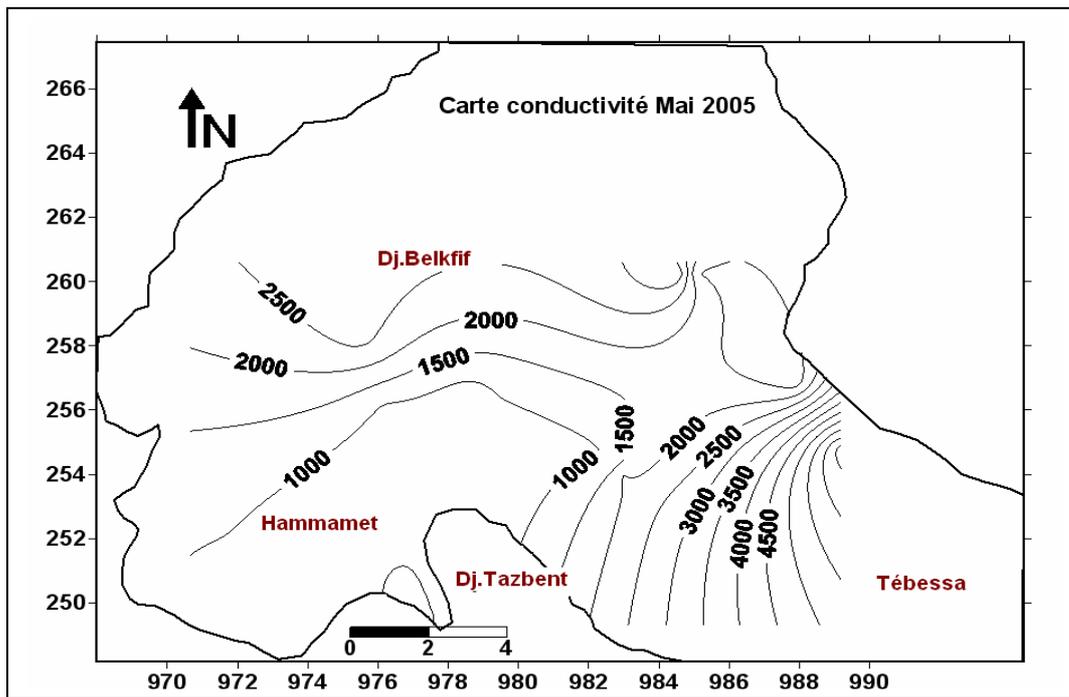


Figure 6 : Carte de conductivité

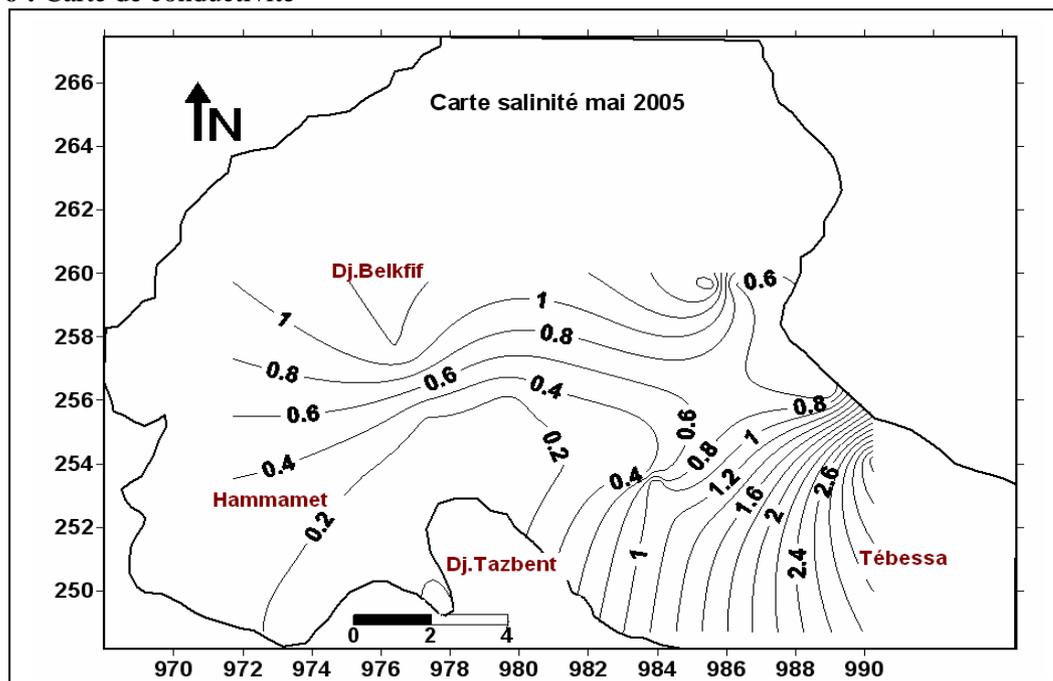


Figure 7 : Carte de la salinité

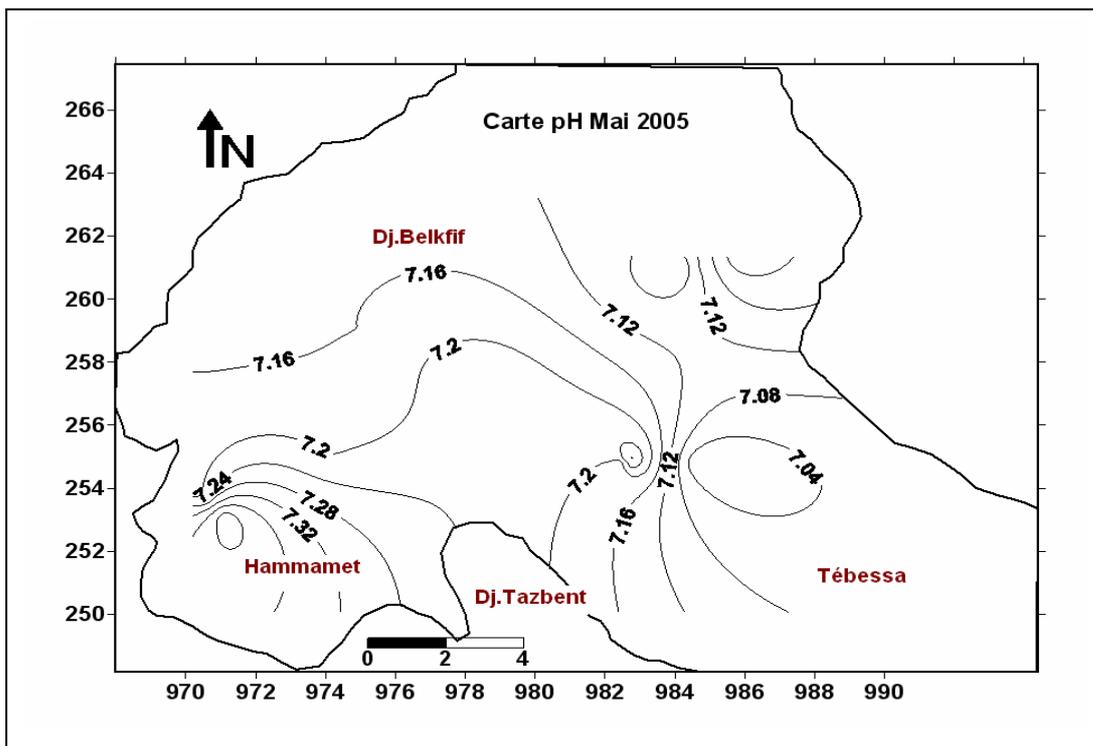


Figure 8 : Carte de pH

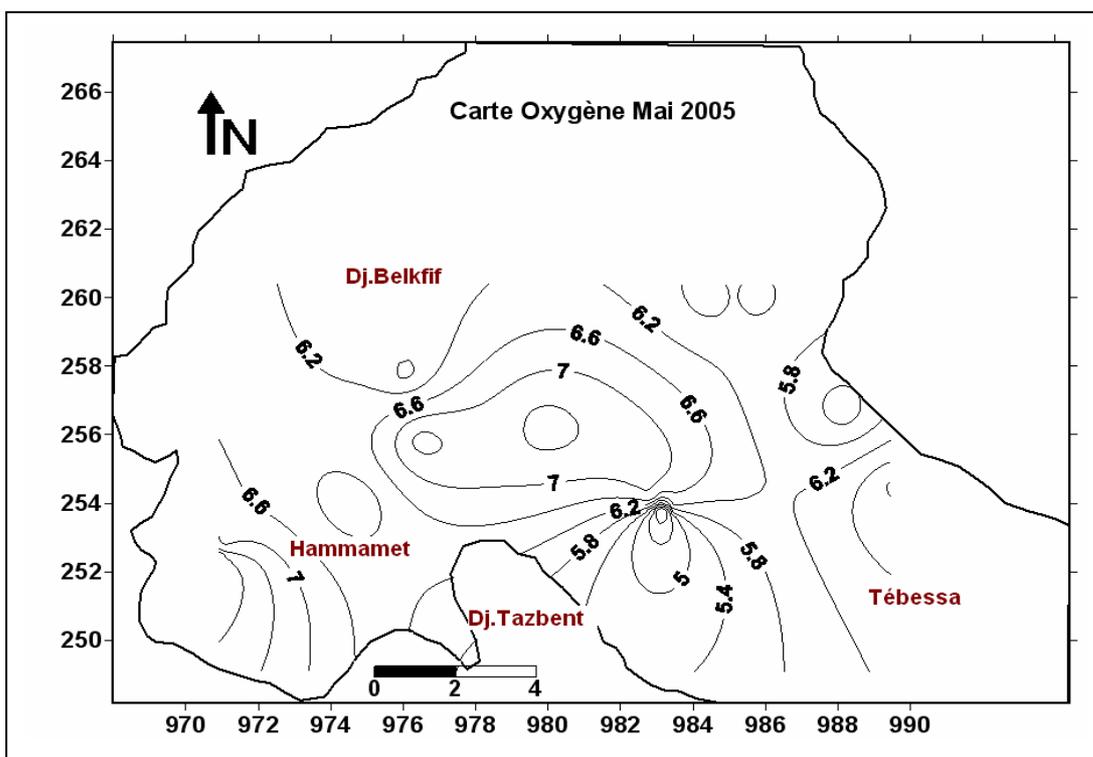


Figure 9 : Carte de l'Oxygène dissous

6.4.2. Éléments majeurs (cations et anions)

a. **Calcium** : l'analyse de la carte du calcium (Fig. 10) nous montre bien que les fortes concentrations sont localisées aux bordures sud ouest de la région et au centre de la plaine. Au niveau de la zone de Hammamet, les teneurs sont généralement faibles [1,19,78,79,80,81]

b. Magnésium : la carte établie (Fig. 11) montre deux zones différentes, dans le centre de la plaine, les concentrations de magnésium sont très fortes, ce ci est du certainement aux apports d'eau souterraines riches en calcium et magnésium suivant la direction principale d'écoulement souterrain SE-NW. Cela démontre aussi que l'alimentation de la nappe se fait par les bordures calcaires et dolomitiques Par contre au niveau de la zone de Ain chabro et Hammamet, les teneurs ne dépassent pas les normes (50 mg/l) [1,19,78,79,80,81]

c. Sodium : la carte établie montre bien que les fortes teneurs sont localisées au centre de la plaine (Fig. 12). les fortes valeurs se rencontrent au centre de la plaine, surtout pendant la période de hautes eaux, ce qui s'explique par le phénomène d'échange de base ; les argiles libèrent le sodium et captent le calcium produit par la dissolution du gypse, entraînant ainsi une dominance du sodium. Au période des basses eaux, les concentrations connaissent une légère baisse ce qui traduit le fait que les échanges décrits précédemment n'ont plus lieu. Cette situation est due aux écoulements des eaux souterraines d'amont en aval auxquels s'ajoute l'effet des eaux douces provenant des bordures qui sont pauvres en sodium [1,19,78,79,80,81].

d. Chlorures : la carte établie (Fig. 13) montre aussi la dominance des chlorures dans le centre de la plaine. Les concentrations sont élevées et atteignent des valeurs oscillant entre 300 et 600 mg/l. Ces fortes valeurs sont dues au lessivage des marnes et des calcaires dolomitiques de la bordure d'une part et au lessivage des sédiments de quaternaire couvrant le secteur d'autre part. La présence des alluvions et de sédiments d'origine évaporitique à la surface du sol facilite le lessivage. Dans la zone de Hammamet les concentrations atteignent 200 mg/l au maximum, les argiles du quaternaire sont à l'origine de ces teneurs. La disposition de ces formations à la surface du sol favorise leur lessivage. Pendant les périodes de basses eaux, l'évaporation intense influence les teneurs surtout quand la surface piézométrique est proche de la surface du sol. À Tébessa les teneurs sont de l'ordre de 600mg/l. Les eaux contenues dans les formations alluvionnaires qui sont riches en sels solubles sont à l'origine de cette augmentation. On peut aussi expliquer ces augmentations en chlorures par la pollution d'origine domestique et agricole [1,19,78,79,80,81]

f. Potassium : la carte établie selon les résultats obtenus (Fig. 14) montre clairement que la teneur de cet élément est très faible et qu'il participe moins à la minéralisation des eaux de la nappe.

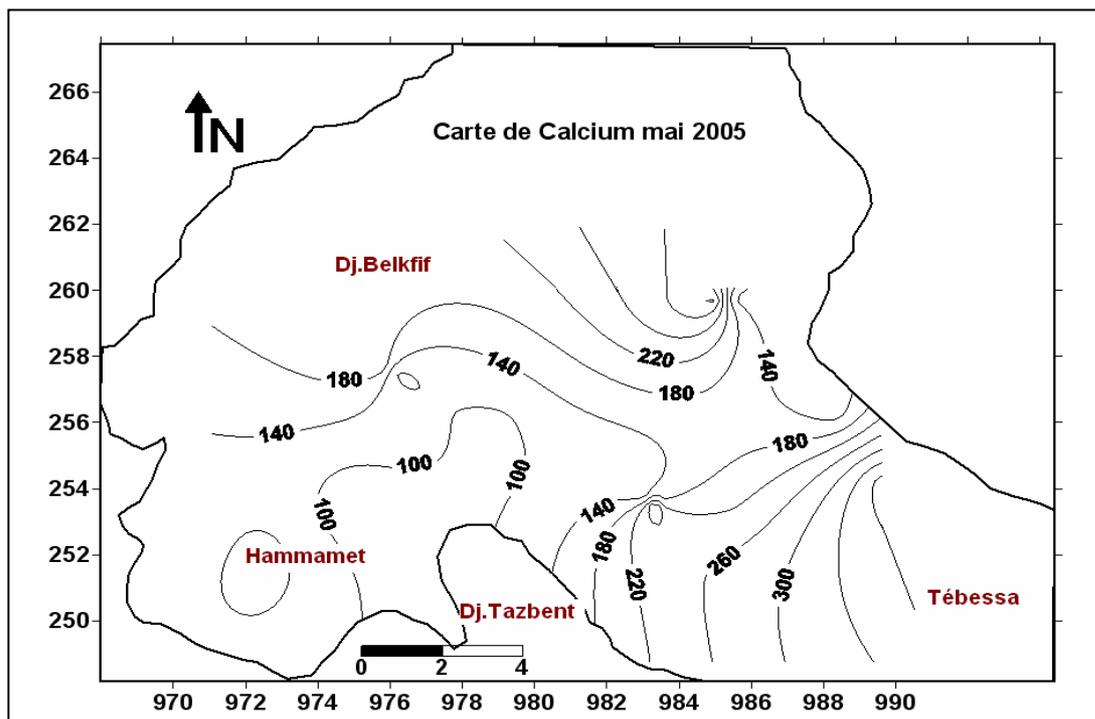


Figure 10 : Carte du Calcium

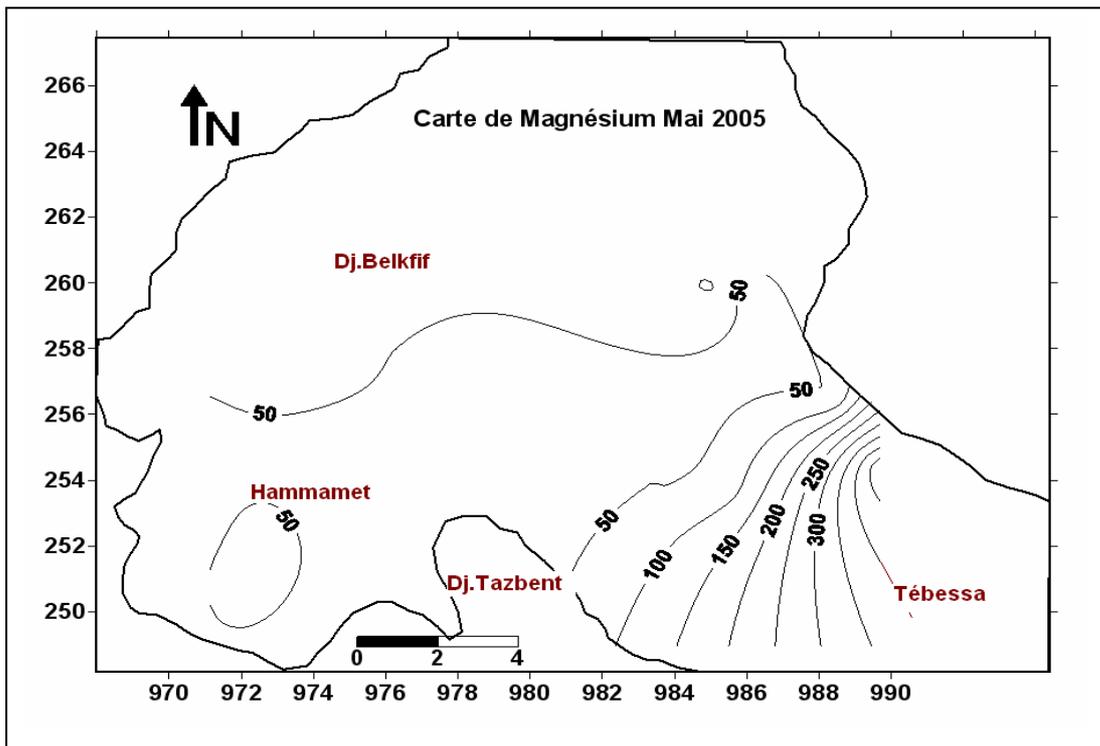


Figure 11 : Carte du Magnésium

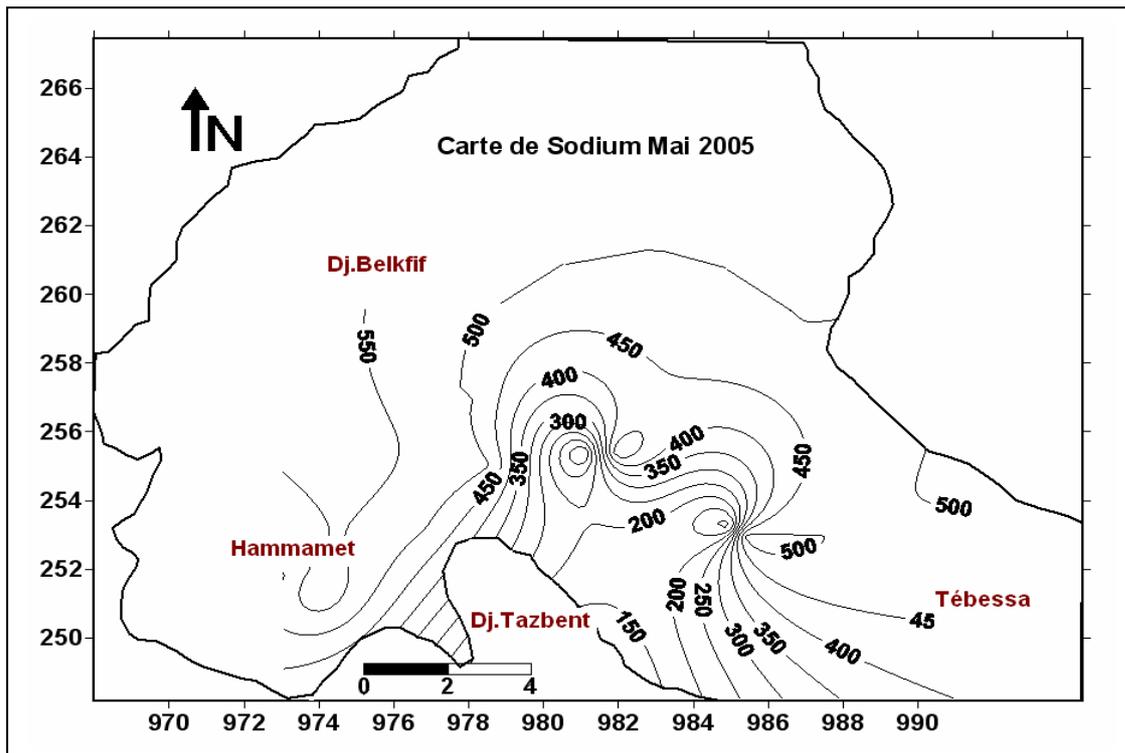


Figure 12 : Carte du Sodium

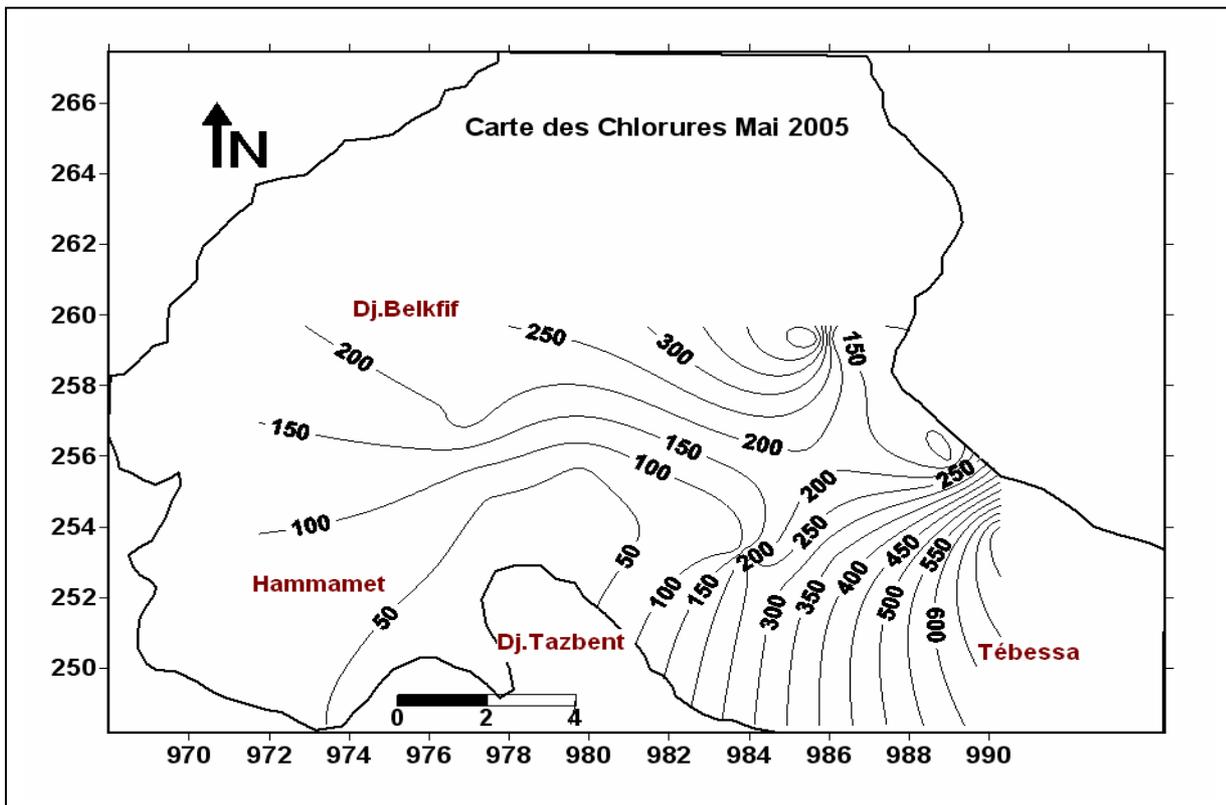


Figure 13 : Carte des Chlorures

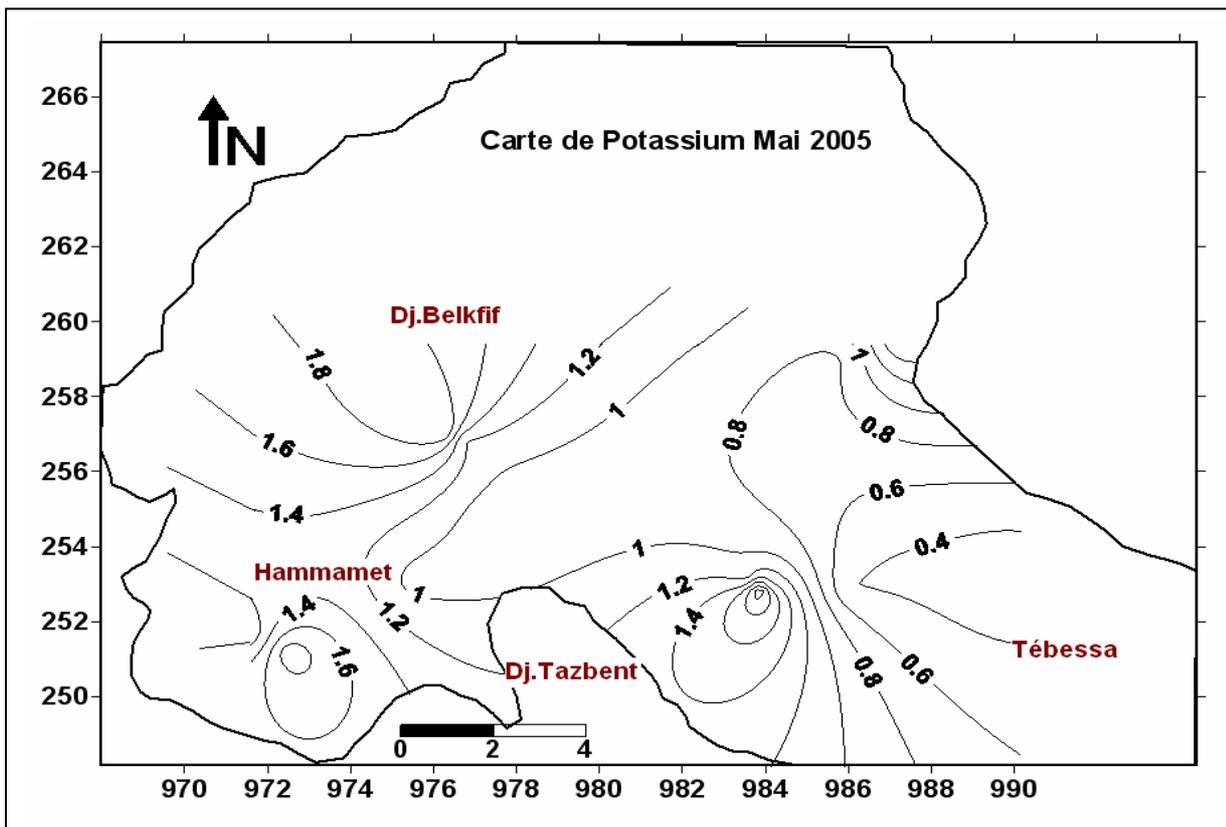


Figure 14 : Carte du Potassium

f. Sulfates : Carte des sulfates hautes eaux : (Fig.15) le lessivage des formations gypsifères entraîne la dilution des formations du trias et l'enrichissement de l'eau en sulfates. Dans la zone de Tébessa on enregistre de fortes teneurs. Le lessivage des formations gypsifères provenant de

Dj.Djebissa est à l'origine de ces concentrations. On note la présence de teneurs importantes à Hammamet et Bir d'Heb qui avoisinent de 500 mg/l. Celles-ci sont dues au lessivage des couches gypsifères de Dj.Belkif. Le lessivage des argiles plio-quaternaire influe sur cette répartition [1,19,78,79,80,81]

Carte des sulfates basses eaux : les concentrations connaissent une augmentation notable suite à l'évaporation qui sévit pendant cette période. À Tébessa les teneurs dépassent 600mg/l. Cette augmentation est due aux effets de l'évaporation qui s'accroît car la surface piézométrique n'est pas profonde. À Hammamet on note des teneurs faibles à moyennes, celles-ci sont le résultat de l'évaporation qui affecte les couches évaporitiques.

g. Bicarbonates : Cartes des bicarbonates hautes eaux : des valeurs importantes apparaissent à la bordure méridionale. Celles-ci sont dues à l'alimentation qui se fait par les bordures. À Hammamet les concentrations sont relativement faibles car le faciès chloruré est le plus dominant. Quelques valeurs importantes apparaissent sur la bordure méridionale qui tirent leur origine des calcaires éocènes et mæstrichtien. Les teneurs croissent dans le sens des écoulements des eaux souterraines (Fig.16)

Carte des bicarbonates basses eaux : les concentrations connaissent une diminution par rapport à la période de hautes eaux, ce qui résulte de l'absence d'apports par les bordures latérales. Comme la nappe est alimentée latéralement par les calcaires bordant la plaine, ces derniers donnent des teneurs en HCO_3 par évaporation [1,19,78,79,80,81]

h. Nitrates : Ils constituent un polluant prédominant. Sur les 14 puits dont les nitrates ont été analysés, 12 présentent une pollution permanente dépassant la norme de potabilité (50mg/l) selon (l'OMS). Ces polluants atteignent des valeurs importantes pendant la période de basses eaux (120mg/l). Leur présence indique l'effet d'épandage des engrais au niveau des terres agricoles. L'excès de nitrates peut être expliqué par des activités bactériennes dans le sol qui produisent des teneurs importantes en nitrates à partir des nitrites et de l'ammoniac. La zone de Tébessa est la plus affectée. On y enregistre des fortes teneurs, car les eaux souterraines sont proches de la surface du sol ce qui les met en contact avec les rejets d'une part, et d'autre part avec l'élevage des animaux (volailles, ovins, bovins) qui produisent des excréments causant une pollution organique difficile à juguler (Fig. 17) [78,79,80,81]

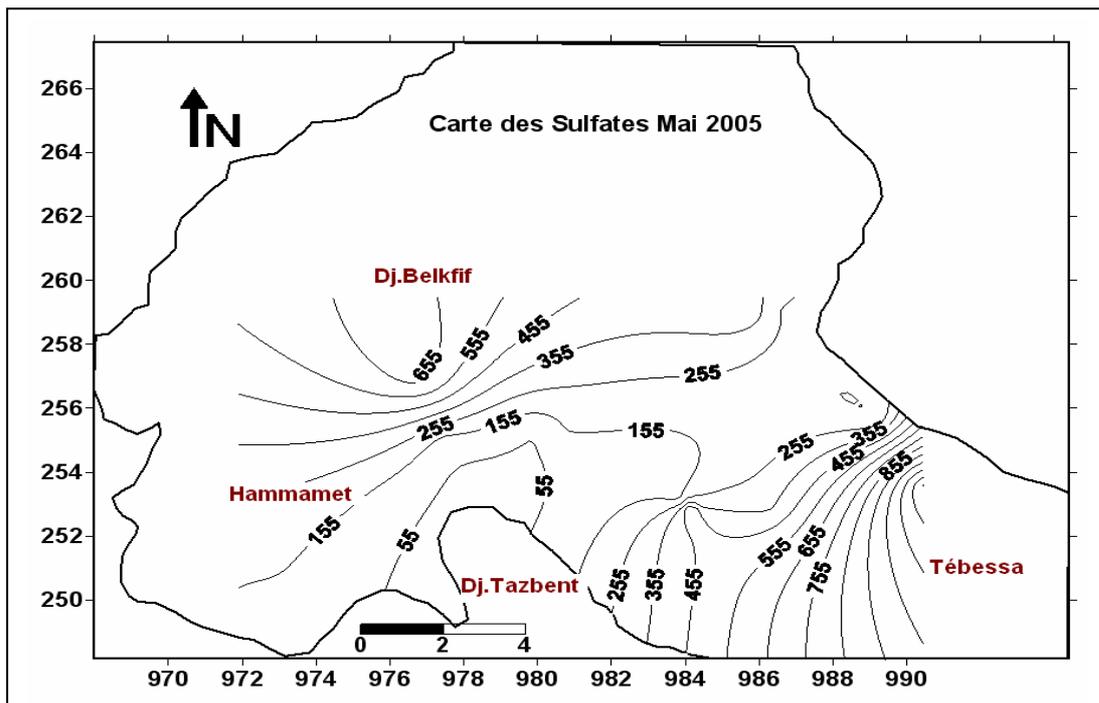


Figure 15 : Carte des Sulfates

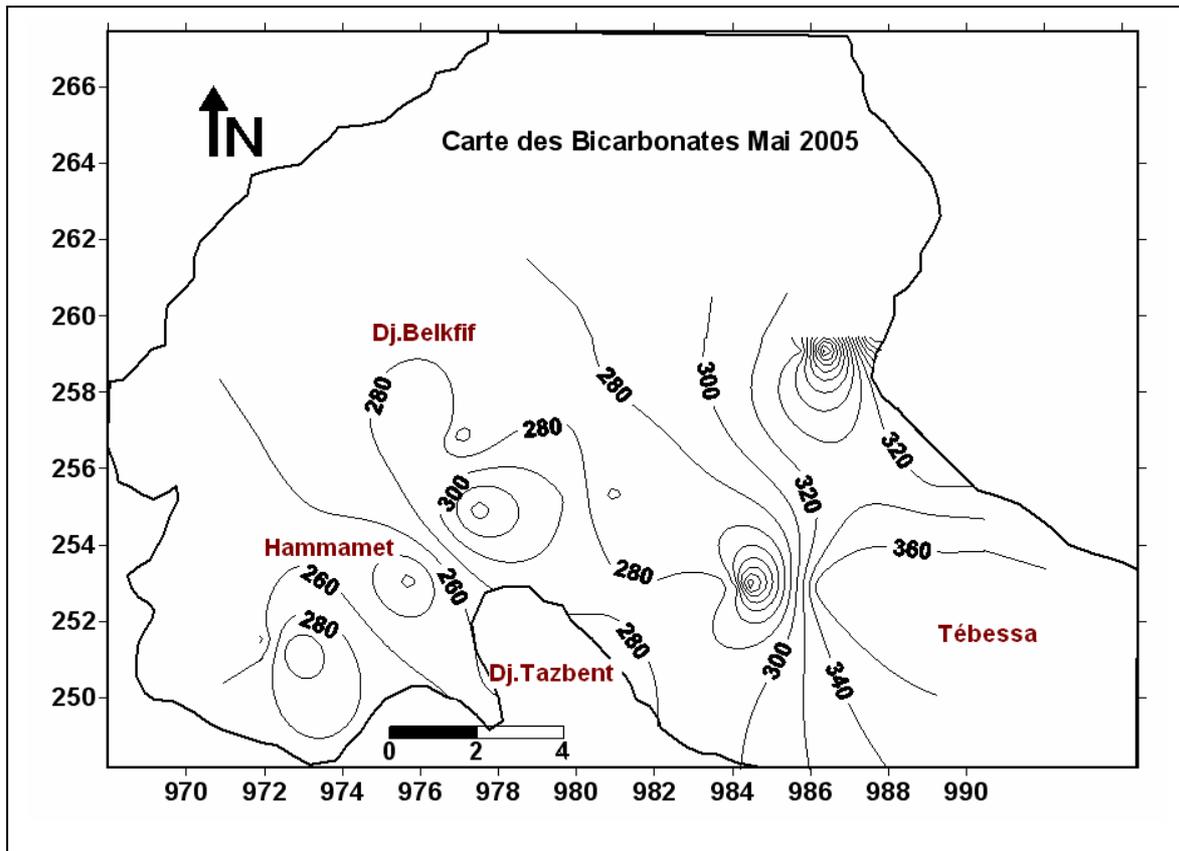


Figure 16 : Carte des Bicarbonates

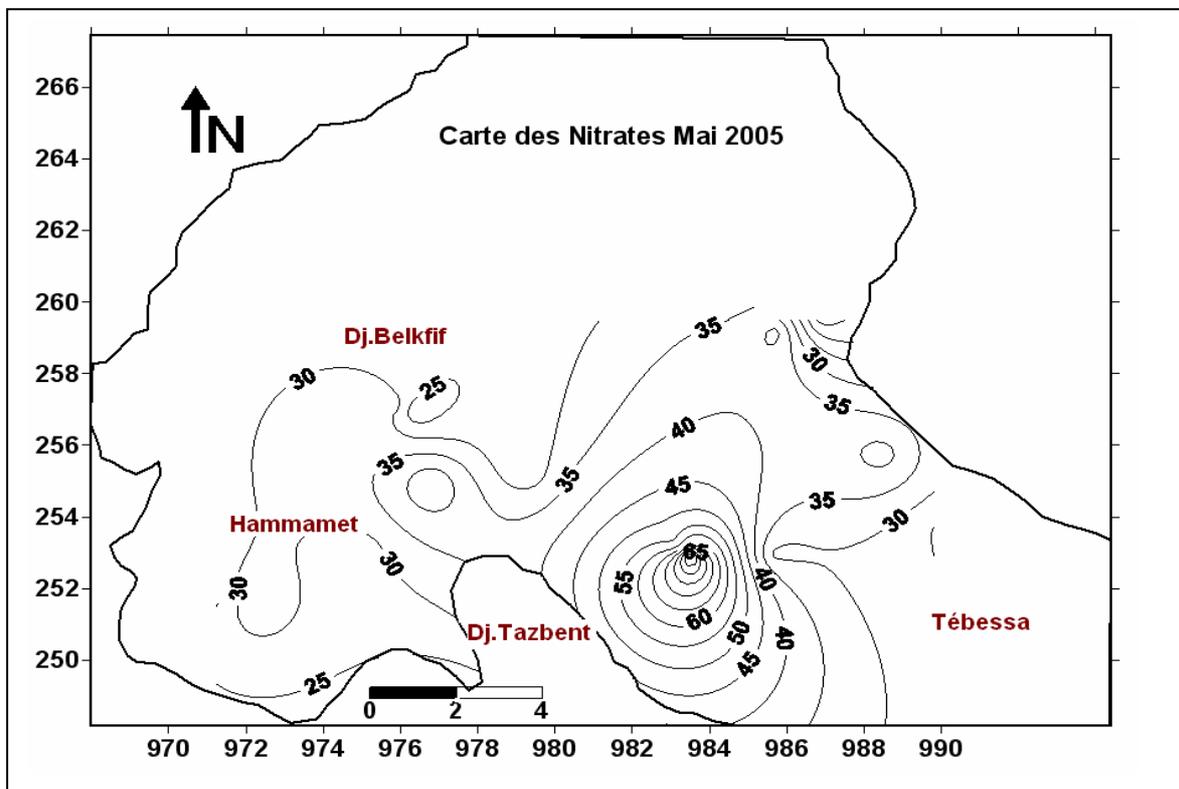


Figure 17 : Carte des Nitrates

6.4.3. Carte des éléments mineurs

a. Silicium : l'analyse de la carte (Fig.18) montre aussi une répartition irrégulière des concentrations en silicium dans les eaux de la zone d'étude. L'existence de cet élément montre clairement l'effet de la matrice sableuse (sable fin et grossier) qui caractérise la lithologie de la formation perméable de la nappe. La dissolution de la silice s'effectue généralement par lessivage des formations géologiques qui contiennent des proportions moyennes des sables. Cela se produit surtout pendant la période d'arrosage et de hautes eaux. [78,79,80,81]

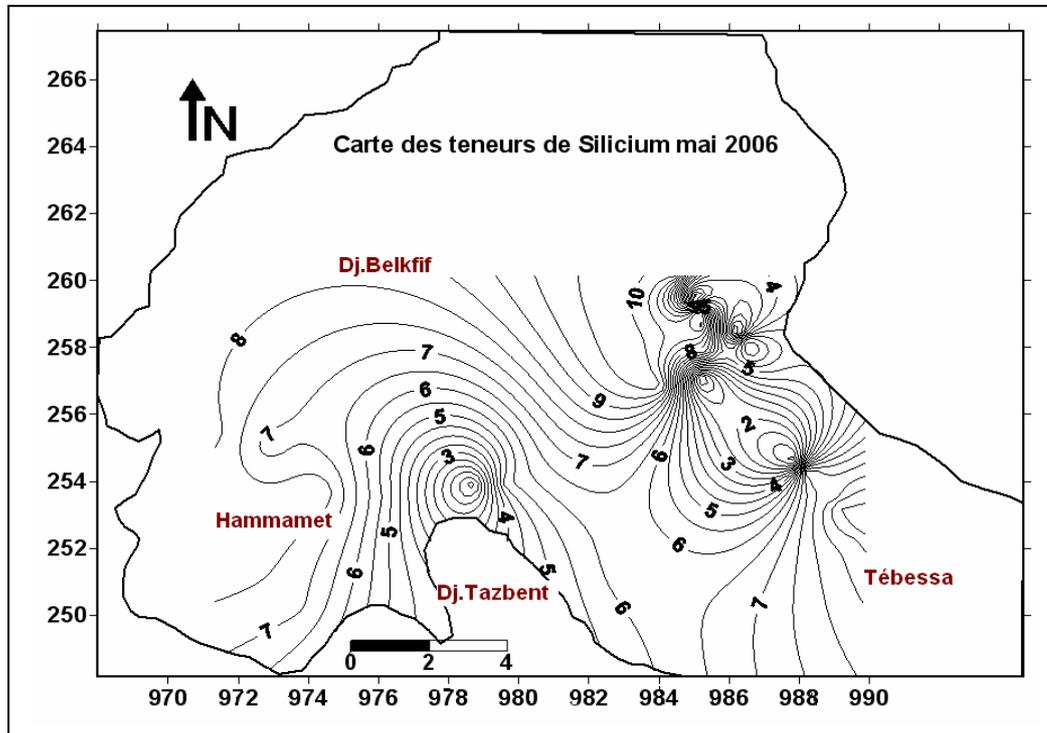


Figure 18: Carte du Silicium

6.4.4. Carte des éléments métalliques en traces

a. Fer : l'analyse de la carte établie (Fig. 19), relative à la période des hautes eaux (Mai 2005), montre que le centre de la plaine présente des teneurs élevées en Fe^{+2} . Les concentrations se diminuent dans le sens d'écoulement principal des eaux souterraines SE-NW. Par contre, dans la zone de Ain chabro et Hammamet, les concentrations sont généralement faibles et ne dépassent pas les normes de potabilité [78,79,80,81].

b. Manganèse : la carte (Fig. 20) qui est relative aux prélèvements effectués au mois de novembre, et qui présente une période sèche dans la région, montre des valeurs généralement faibles dans toute la région [78,79,80,81].

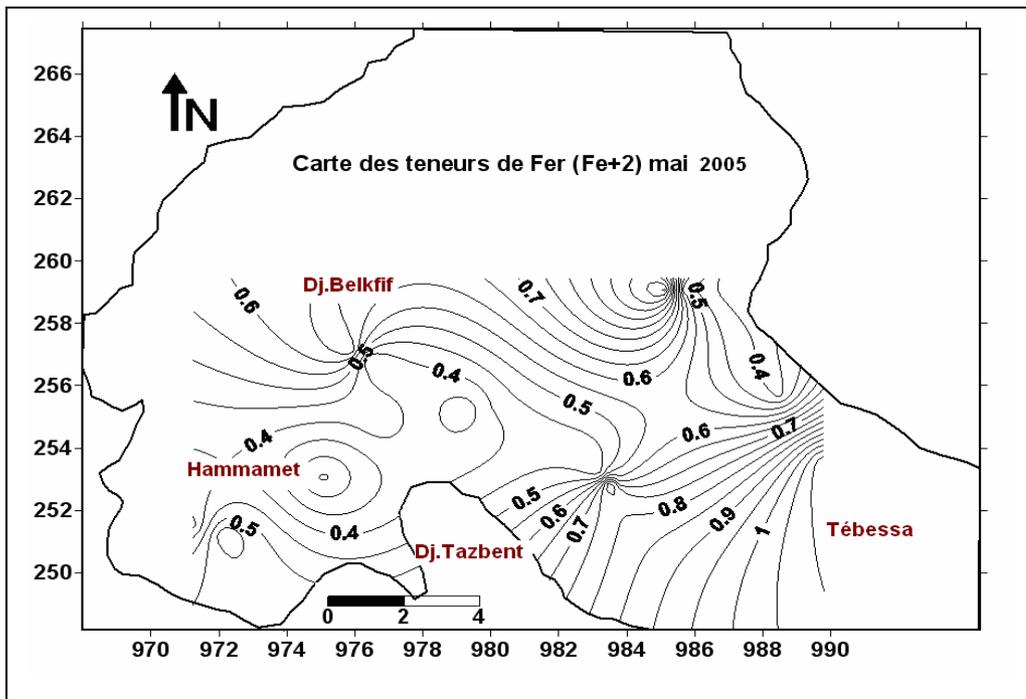


Figure 19 : Carte des teneurs en Fer

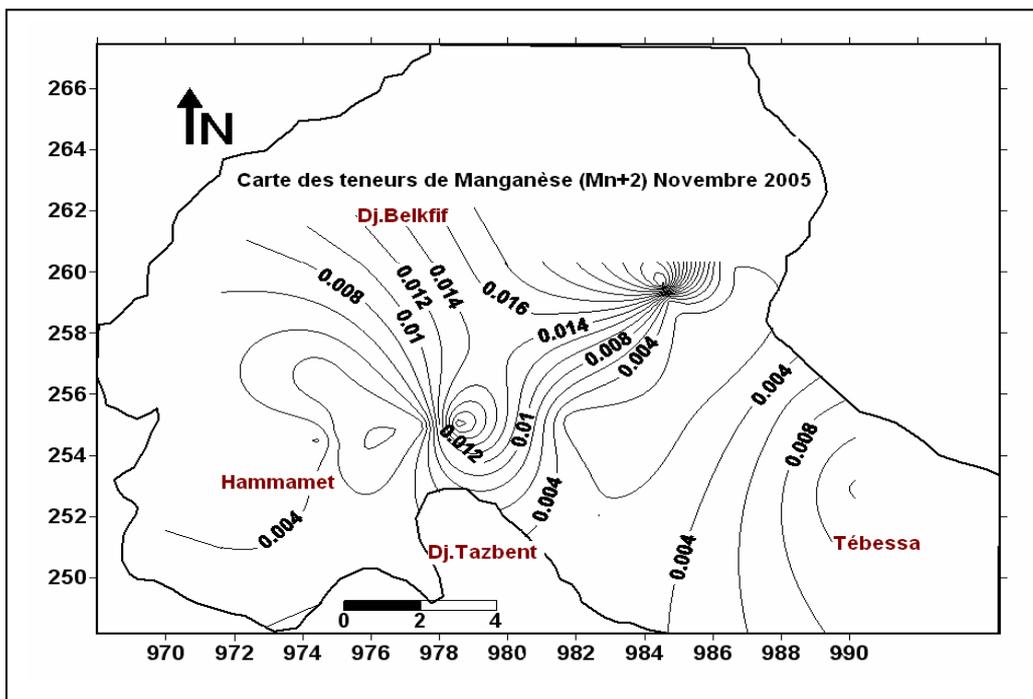


Figure 20 : Carte du Manganèse

7.Étude de l'origine des éléments chimiques : On détermine ici l'origine géologique des éléments chimiques à partir de la bonne corrélation qui existe entre eux. Deux relations principales seront examinées, comme détaillé ci-dessous.

a. Le couple $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$

Ces deux éléments chimiques sont souvent liés à la dissolution de l'halite (Na Cl) dans les eaux naturelles. L'évolution de Na^+ est étudiée en fonction des teneurs en chlorure, car ce dernier est considéré comme un traceur stable et conservatif des évaporites. Il est très soluble, entre rarement dans les précipitations salines, n'intervient pas dans les phénomènes d'oxydoréduction et est peu influencé par l'intervention des bactéries. De plus, son déplacement n'est pas retardé dans l'eau [78,79,80,81]

La représentation graphique de l'évolution des teneurs en sodium en fonction des concentrations en chlorures (figure 21) montre deux processus :

- pour les fortes concentrations en chlorure on observe une relation directe des ions Na^+ avec les ions Cl^- , indiquant l'origine chlorurée sodique commune de ces deux éléments chimiques ;
- pour les faibles concentrations en chlorure on observe un excès constant des teneurs en sodium, ce qui s'explique par l'existence d'une autre origine pour les ions sodiques faisant croître la concentration du sodium par rapport à celle des chlorures. Cet apport supplémentaire pourrait provenir de l'altération des silicates sodiques (Argiles).

Cependant, comme cet excès en Na^+ est accompagné par un déficit en Ca^{2+} par rapport à HCO_3^- et SO_4^{2-} , l'augmentation des teneurs en Na^+ ne peut pas s'expliquer uniquement par un échange de base lié aux minéraux argileux qui fixent un ion Ca^{2+} après libération de deux ions Na^+ . La projection des différents points sur le diagramme $\text{Ca}^{2+} / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) - \text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ montre que 75 % des points d'eau subissent un échange de base, 10 % des points présentent l'état naturel et 15 % présentent un excès en Ca^{2+} par rapport aux ions HCO_3^- et SO_4^{2-} , dû sûrement aux formations gypseuses qui fournissent plus d'ions Ca^{2+} .

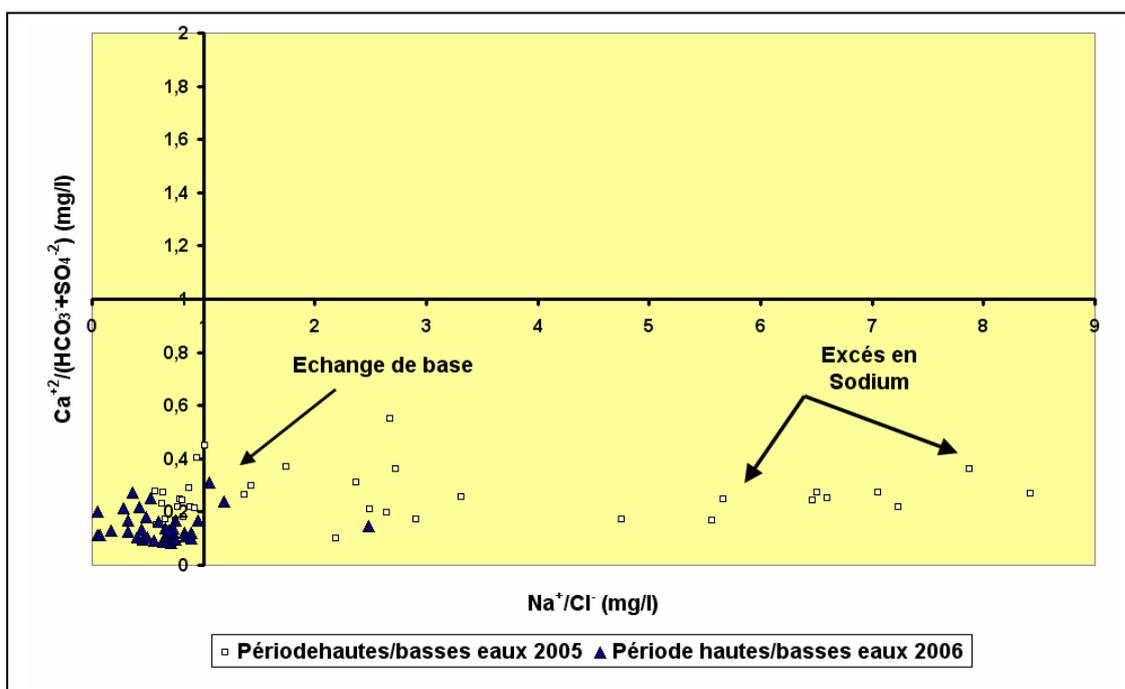


Figure 21 : échange de base[78,79,80,81]

b. Origine du Calcium : On examine ici l'origine du calcium en fonction de deux éléments chimiques (bicarbonates et sulfates) qui indiquent ses deux origines principales (calcaires et gypse). La représentation graphique (Figure 22A) montre un ensemble de points qui se positionnent selon un seul groupement, indiquant l'origine carbonatée des ions du calcium, et l'évolution exponentielle de ces deux éléments.

Pour déterminer l'évolution du calcium en fonction des deux éléments (HCO_3^- , SO_4^{2-}), une représentation graphique des teneurs en Ca^{2+} en fonction de ($\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$) a été réalisée (Fig, 22B). Cette dernière fait apparaître deux évolutions : un excès exponentiel en Ca^{2+} , indiquant l'origine évaporitique de Ca^{2+} par le gypse, et d'autre part une évolution inverse, interprétée comme le résultat de la dissolution des formations carbonatées. Ces deux représentations nous montrent que la dissolution des ions calcium à partir des formations carbonatées est plus importante et que les fortes concentration en Ca^{2+} ($> 250 \text{ mg/l}$) sont aussi plus liées à la dissolution des évaporites [78,79,80,81]

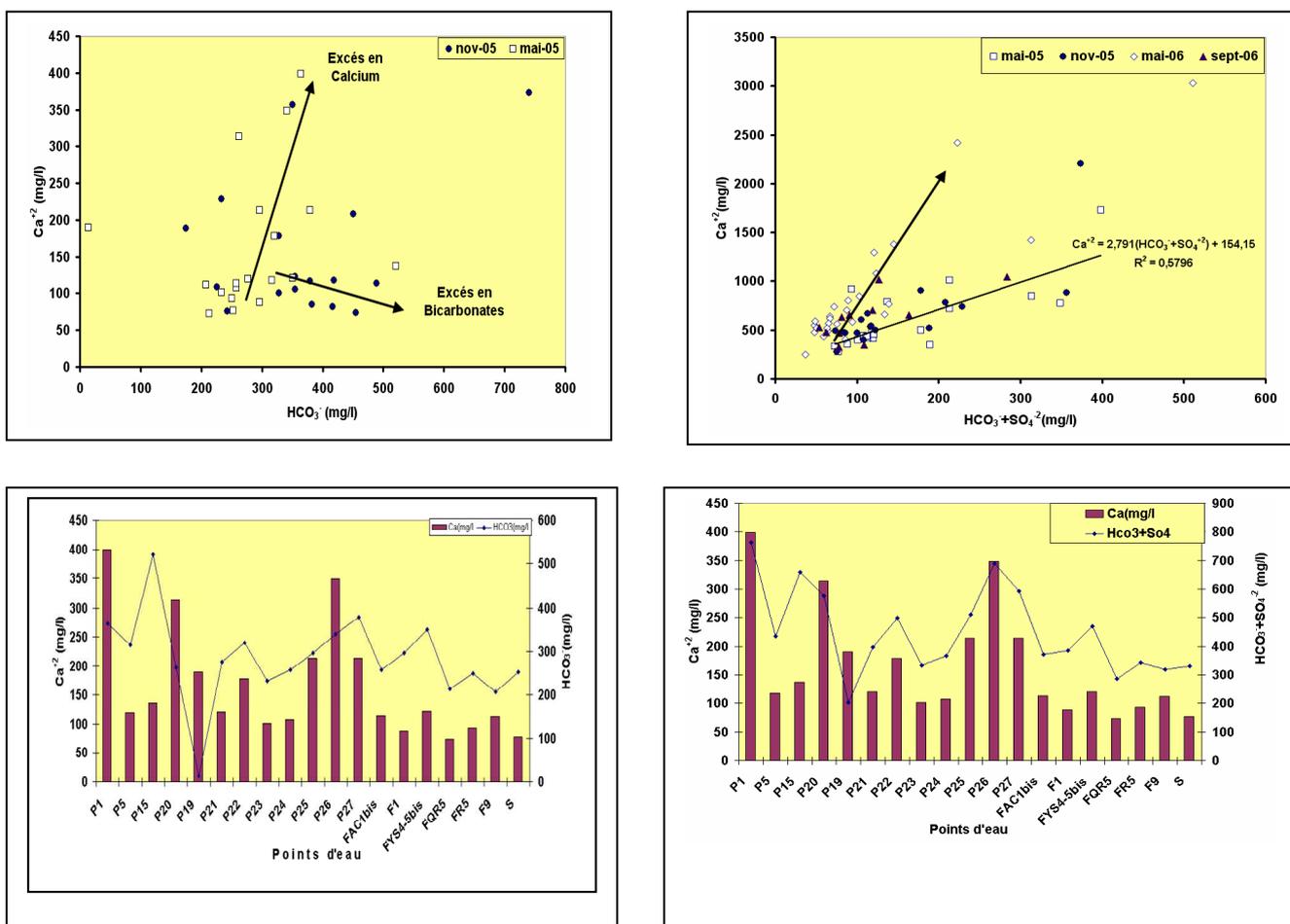


Figure 22 A,B : origine du calcium dans la région d'étude [78,79,80,81]

8. Étude des rapports caractéristiques : Nous avons utilisé quatre rapports caractéristiques dont deux sont utilisés pour déterminer l'évolution des éléments chimiques en fonction de la conductivité :

a. La relation $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ -conductivité électrique : Ce rapport nous permet de déterminer la manière selon laquelle évolue la dissolution des ions évaporitiques (Na^+ , marqueur de l'halite, et SO_4^{2-} , marqueur du gypse) en fonction de la conductivité.

Le rapport $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ montre des valeurs inférieures à 1 dans la majorité des points d'eau, indiquant ainsi un enrichissement des eaux de la nappe en ions de sulfates dans tout l'aquifère à l'exception des puits P₂₆ et P₂₇ qui se trouvent dans la plaine où le rapport atteint des valeurs

supérieures à 1, ce qui constitue un taux élevé en chlorures. Une augmentation des teneurs en chlorure vers l'Est est observée en rapport avec l'éloignement des terrains triasiques salifères dont l'influence est plus marquée à l'ouest et au Nord-Ouest. Cette augmentation ne peut s'expliquer que par l'effet d'une pollution anthropique de surface, souvent l'effet des eaux usées (Fig.23A et 23B) [78,79,80,81].

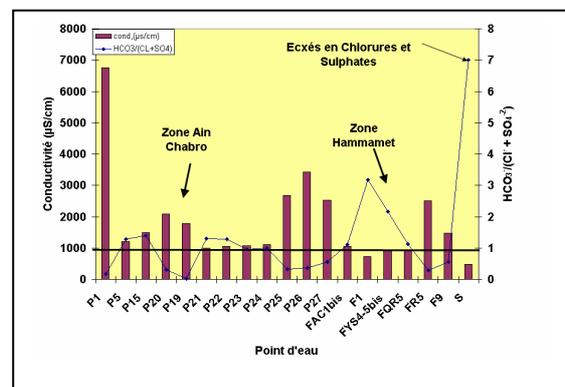
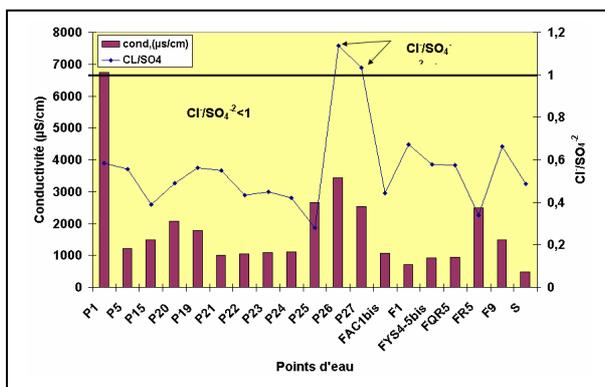
b. La relation $\text{HCO}_3^-/(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ – conductivité électrique : Nous constatons ici une relation inverse entre le rapport $\text{HCO}_3^-/(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ et la conductivité. Cette diminution du rapport ($r < 1$) est accompagnée d'une augmentation de la conductivité, ce qui explique bien que celle-ci est due à un excès en ions SO_4^{2-} et Cl^- . Cela a été constaté surtout dans les puits de faible profondeur se trouvant au centre et au Nord de la plaine.

En revanche, l'augmentation du rapport $\text{HCO}_3^-/(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ ($r > 1$) dans les autres points, notamment dans les forages et les puits de grande profondeur (> 60 m), s'explique par un excès en ions des bicarbonates avec une conductivité moyenne ou faible ($< 1000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Par conséquent, deux pôles sont observés : l'un, carbonaté, caractérisé par une dominance des ions HCO_3^- et par des conductivités inférieures à $1000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, et l'autre, représentant le pôle évaporitique et assurant une dominance des ions Cl^- et SO_4^{2-} . Ce pôle apparaît pour les fortes conductivités ($> 1000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) et rassemble la majorité des points qui se trouvent au centre de la plaine.

Ces graphes nous permettent de dire que les faibles valeurs de conductivité ($< 1000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) où il n'y a pas de formation évaporitiques sont liées aux ions bicarbonates. En revanche, lorsqu'elle dépasse $2000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, la conductivité devient liée plus fortement aux ions évaporitiques Cl^- et SO_4^{2-} (Fig.23 C, D) [78,79,80,81].

c. Le rapport $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$: Il montre également des valeurs inférieures à 1 indiquant la prédominance des ions calcium sur les ions magnésium, sauf au puit P_1 où le rapport est supérieur à 1, ce qui traduit l'influence de la matrice calcaire au niveau des affleurements des bordures SW de l'aquifère. Cette dominance est le résultat d'une sous saturation des eaux en calcite. En outre, ce rapport inférieur à 1 pourrait trouver son d'origine dans l'évaporation du magnésium [78,79,80,81].

d. Le rapport $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$: Il montre des valeurs inférieures à 1 au Nord-Ouest et à l'Ouest, dans les zones proches des terrains triasiques salifères, traduisant une prédominance des ions bicarbonates. En s'éloignant vers l'Est, ce rapport tend à s'élever pour devenir supérieur à 1 en rapport avec l'influence des terrains Cénomaniens, notamment dans les puits $\text{P}_1, \text{P}_{19}, \text{P}_{26}$ et P_{20} , qui sont situés dans le centre de la plaine et dans la zone de Ain chabro. Cette dominance des chlorures pourrait s'expliquer par l'effet des eaux usées rejetées en surface (pollution anthropique) [78,79,80,81].



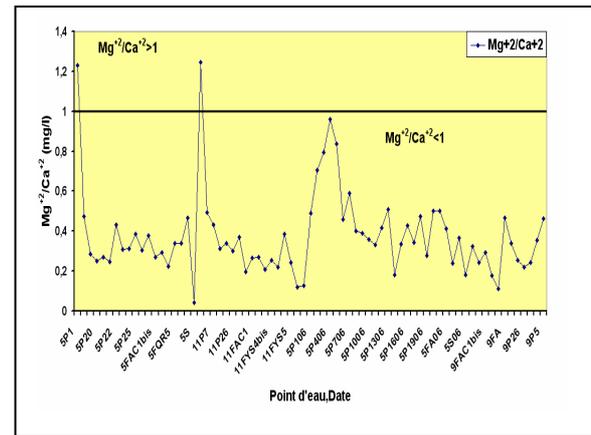
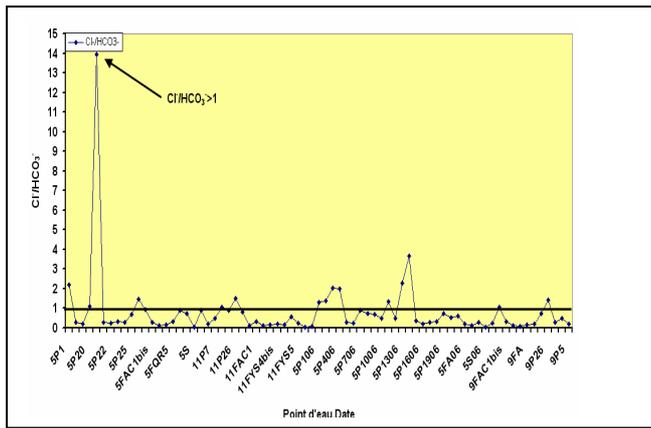


Figure 23 (A, B, C, D) : origine de la salinité en fonction des rapports caractéristiques[78,79,80,81]

9.Étude géochimique de l'évolution des minéraux : Un calcul de l'indice de saturation des minéraux dissous dans l'eau a été mené en utilisant la loi de DEBYEHUCKEL à l'aide du logiciel Diagramme (WATEQ). Les résultats obtenus (Tab. 22) montrent que les minéraux se répartissent en trois groupes [78,79,80,81] :

- Le groupe des carbonates présente des indices de saturation différents selon la période (hautes et basses eaux). La dolomite est souvent à l'état de sursaturation avec un indice qui varie entre 2,11 et -2,66. Ce dernier est suivi par les minéraux de la calcite et de l'aragonite avec un indice de saturation qui varie respectivement entre 1,21 et 1,14, et 1,06 et 1,29, indiquant le passage d'un état de sous saturation à un état de sursaturation. La répartition dans l'espace de chaque élément chimique montre que les concentrations les plus élevées sont observées soit près du Dj Belkif et dans la zone de Ain chabro au centre de la plaine, soit au niveau des zones carbonatées qui fournissent les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} , ces derniers se combinant avec le CO_2 de l'atmosphère pour donner des minéraux carbonatés ;
- Le groupe des évaporites est sous-saturé par rapport à l'anhydrite et le gypse, avec des indices variant respectivement entre -0,63 et -2,36, -0,38 et -2,11, et -5,08 et -8,64. L'augmentation des valeurs de l'indice de saturation des minéraux évaporitiques s'observe au niveau de la plaine, près des lentilles évaporitiques.

Le calcul des indices de saturation des minéraux dans l'eau indique que seuls les minéraux carbonatés tendent à précipiter sous forme de calcite et de dolomite, surtout pendant la période de hautes eaux. En revanche les minéraux évaporitiques sont toujours à l'état de sous saturation, même les ions Na^+ , Cl^- et SO_4^{2-} à forte concentration dans l'eau. Cela est expliqué par des valeurs élevées de la constante d'équilibre des minéraux évaporitiques ($NaCl$ (1,58) ; $CaSO_4$ (-4,85)), ce qui permet aux éléments évaporitiques de se présenter dans l'eau à des concentrations élevées. En revanche, pour les minéraux carbonatés, la constante d'équilibre est plus faible (Dolomite (-17,02), Calcite (-8,37)), ce qui produit une précipitation rapide des éléments chimiques.

Tableau 22 : Indice de saturation calculé [78,79,80,81]

Période de prélèvement	Anhydrite	Aragonite	Calcite	Dolomite	Gypses	Halite	SiO2(a)
mai-05	-0,63/-2,36	-1,29/0,06	-1,14/0,21	-2,66/0,56	-0,38/-2,11	-5,08/-8,64	
nov-05	-0,63/-2,29	0,19/1,06	0,35/1,21	0,28/2,11	-0,38/-2,04	-5,15/-8,31	
mai-06	-0,31/-4,00	-0,35/0,89	-0,20/1,03	-0,61/2,23	-0,47/-3,75	-4,53/-8,42	-1,06/-1,42
sept-06	-0,89/-1,65	-0,01/0,32	0,10/0,47	-0,13/0,80	-0,64/-1,40	-5,41/-6,82	-1,08/-1,14

10. Conclusion

L'interprétation hydro chimique des résultats a montré une forte salinité des eaux souterraines de la plaine de Tébessa Hammamet. Trois faciès chimiques dominants sont observés, l'un bicarbonaté calcique dans les points d'eau proches des bordures carbonatées, et les autres chloruré sodique et sulfaté calcique, caractérisant les points d'eau dans le centre et la partie Nord de la plaine.

La confrontation du contexte géologique de la région avec la répartition spatiale des éléments chimiques montre que l'origine de cette salinité est liée principalement à la dissolution de trois types de formations :

- évaporitiques des affleurements triasiques existants au niveau de Dj. Djebissa et aux pieds SE de Dj Belkif à la limite NW de la plaine ;
- carbonatées aux bordures SW de la plaine ;
- alluvionnaires au centre de la plaine.

La variation saisonnière de la concentration des éléments chimiques est liée à l'effet des conditions climatiques de la région (précipitations, évaporation), à l'exploitation des ressources par pompage et à l'irrigation.

L'analyse du diagramme $Ca^{+2}/(HCO_3^- + SO_4^{2-}) - Na^+/Cl^-$ a montré l'existence du phénomène d'échange de base entre les eaux de la nappe et les formations géologiques riches en argiles. Ce processus a été démontré par l'augmentation des teneurs en Na^+ par rapport à celle du Cl^- ainsi que par la diminution des ions Ca^{2+} par rapport à HCO_3^- et SO_4^{2-} .

Des concentrations inquiétantes en éléments traces ont été enregistrées dans les eaux des puits (Fe^{+2} , Mn^{+2} , Cr^{+2} , Pb^{+2} , Zn^{+2} , Sr^{+2}). Ceci ne peut s'expliquer que par l'effet de lessivage des déchets d'origine différentes (domestique, agricole, industriels), et la corrosion des canalisations par les eaux salées. D'autre part, des contaminations bactériologiques ont été constatées dans les puits de faible profondeur (cf. étude de la qualité bactériologique des eaux, P 89).

Le calcul de l'indice de saturation des minéraux chimiques montre la forte tendance des minéraux carbonatés à la précipitation (sursaturés) par rapport à celles des minéraux évaporitiques (sous-saturés), ce qui permet aux éléments chimiques de se présenter à des concentrations élevées [78,79,80,81]

2. Qualité bactériologique des eaux souterraines et de surface

1.Introduction

Les micro-organismes sont peu nombreux dans les eaux de nappe du fait des conditions généralement anaérobies. Le transfert de matière organique dans la nappe favorise leur prolifération. Les germes pathogènes sont généralement associés aux coliformes et streptocoques fécaux: la présence de ces derniers indique une pollution par les eaux vannes, les eaux de station d'épuration, les rejets d'élevages industriels... et la possibilité d'occurrence de germes pathogènes.

Dans le but de protéger l'homme du risque sanitaire lié à l'utilisation d'une eau généralement polluée on a besoin de connaître les microorganismes présents dans cette eau en les identifiant et en les dénombrant. L'analyse bactériologique des eaux souterraines de la nappe alluviale Ain Chabro-Hammamet nous permet de définir la qualité bactériologique des ouvrages de captage (forage et puits des agriculteurs) et de définir les causes de leur pollution microbiologique.

2. Étude de la relation oued nappe

La région de Tébessa a un réseau hydrographique très dense. Les eaux de surface du bassin versant encadrant la plaine au Nord, au Sud et à l'Est sont collectées par les oueds El Kébir, Chabro, Serdies, Bouakous et Ksob, qui appartiennent au sous bassin versant de l'oued Mellègue. L'axe principal du réseau hydrographique est l'oued Chabro. Ce dernier reçoit les eaux des oueds de Bouakous et Serdies drainant la plaine de Youkous en rive gauche, et il reçoit également les eaux de l'oued El Kébir qui draine la plaine de Tébessa en rive droite.

L'oued El Kébir collecte tous les affluents de la plaine et constitue un important tracé de la région. Il traverse la plaine selon une direction prédominante SE-NW sur une longueur de 29.75 Km, avec de nombreuses ramifications.

Les calculs de pente, effectués sur un profil longitudinal de l'oued, ont montré que la pente faiblit en allant de la partie amont vers la partie aval (0.52 % (partie amont), 0.40 % (partie centrale), 0.20 % (partie avale)) [1,19,70,78,79,80,81]. Puisque la pente décroît de l'amont à l'aval, la vitesse d'écoulement est très grande en amont puis plus faible en aval. Cette étude de profil en long montre que la vitesse d'écoulement ainsi que la pente diminuent de l'amont à l'aval, de sorte qu'au niveau d'Ain chabro la pente et la vitesse d'écoulement atteignent leurs valeurs minimales.

La figure suivant présente la relation possible qui peut s'établir entre l'oued et la nappe phréatique pendant les deux périodes caractéristiques du régime d'eau dans une région. Il est évident que, en été, c'est la nappe qui alimente l'oued, en lui assurant un débit d'étiage plus ou moins important selon la région. Par contre, en hiver, c'est l'oued qui alimente la nappe. Pour le cas de la nappe alluviale Tébessa-Hammamet, c'est certainement le cas, la proximité du forage (F₁) à l'oued de bouakous, nous confirme cette relation. Viennent ensuite les résultats des analyses bactériologiques, qui prouvent en quelques sortes l'effet de l'infiltration des eaux de surface polluées sur la qualité microbiologique de l'eau de la nappe.

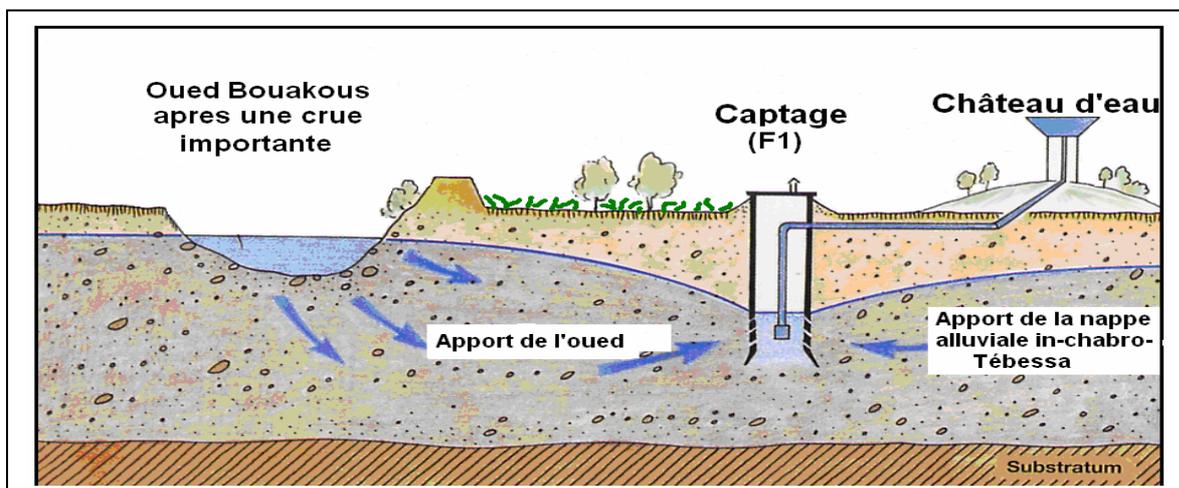


Figure 1 : Relation oued-Nappe [78,79,80,81].

2.1. Composition lithologique des berges et du lit de l'oued : La composition lithologique du lit et des berges diffère d'une partie à l'autre de la zone (amont, centre, aval) et dévoile l'importance de la vitesse d'écoulement et de la pente naturelle.

En amont où la pente vaut 0.52 %, la lithologie du lit de l'oued est dominée par les grands blocs, les alluvions et les galets, traduisant le fait que le courant d'eau est fort et provoque un élargissement important de l'oued, alors que les berges sont formées par des limons et des argiles. Pour la partie centrale ayant une pente plus faible 0.40 %, le courant d'eau ne transporte que les petits blocs avec une abondance de graviers et de limons qui constituent le lit de l'oued.

Dans la partie aval et près de la zone de Ain Chabro, la pente devient plus faibles (0.20%), ce qui implique une faible profondeur ; les berges de cette zone sont formées généralement d'argiles et de limons, et le lit de l'oued est formé par des alluvions. On peut mettre en évidence l'existence d'une relation directe entre la nappe de la région et l'oued, au niveau de la région d'Ain Chabro et au voisinage de l'oued Bouakous, où la pente faible et la composition lithologique du lit et des berges permettent l'infiltration des eaux de surface (eaux de ruissellement, eaux usées...) vers la nappe.

L'existence d'une telle relation favorise le transfert des polluants métallique, organiques, bactériologique vers les eaux souterraines (Fig.3-8) C'est ce que nous allons vérifier par des analyses bactériologiques effectuées sur un certain nombre de puits et de forages [1,19,70,78,79,80,81].



Figure 2. Écoulement d'eau dans l'oued Bouakous après une pluie orageuse (Décembre, 2004) [78,79,80,81]

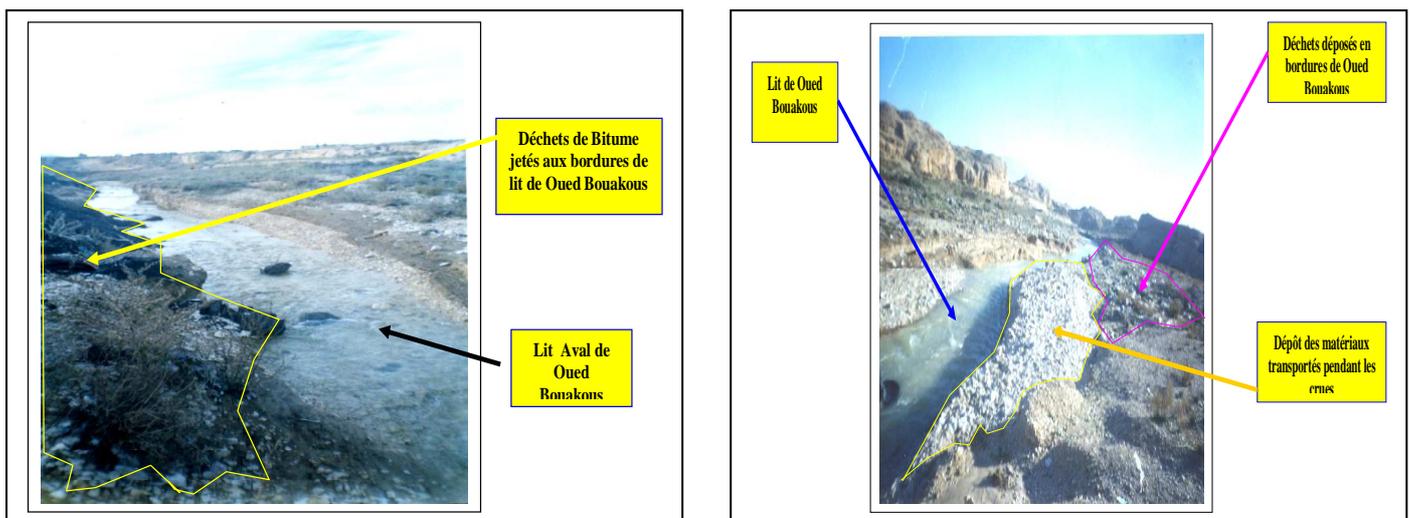


Figure 3,4 : Contamination du lit aval de l'Oued Bouakous par les déchets de bitume (Décembre, 2004) [78,79,80,81]



Figure (5-8) : Rejet des déchets urbains et industriels dans l’oued Bouakous [78,79,80,81]

D’abord, il faut présenter quelques informations générales sur les germes qui peuvent polluer l’eau et leurs effets sur la santé humaine ainsi que le mode opératoire de détection au laboratoire d’hygiène :

3. Caractères biochimiques des germes qu’on recherche habituellement dans les eaux :

L’analyse bactériologique d’une eau de consommation ou usée, consiste à y rechercher la présence de germes pathogènes dont la majorité des espèces est d’origine fécale et se comporte chez l’homme comme des germes saprophytes tel que les streptocoques et les coliformes. Cette analyse consiste à rechercher [19] :

3.1. Les Coliformes : dans ce groupe existe les entérobactéries, c’est-à-dire les coliformes totaux et coliformes fécaux (*Escherichia Coli*).

- **les Coliformes Totaux :** Ils sont présents dans les excréments d’animaux, le sol et la végétation. La présence de ces bactéries dans les puits peut signifier que les eaux de surface s’infiltrant dans les puits.
- **les Coliformes Fécaux (*Escherichia – Coli*) :** Ils se trouvent dans le système digestif des être humains et des animaux. Si elles sont présentes dans les puits, cela peut vouloir dire que l’eau est contaminée par du fumier ou des eaux usées provenant d’une fosse septique environnante ou encore d’un parc d’engraissement. les bactéries *E.Coli* posent un danger pour notre santé. Dans ce cas, la détermination des germes est obligatoire dans l’eau potable

car sa présence indique une contamination fécale. Le taux indiquant la présence des germes fécaux est fourni par la méthode de dénombrement des germes (Colimétrie).

3.2. Les streptocoques : Ce sont des germes groupés en chaînettes flexueuses de longueurs variables. Certains streptocoques sont non pathogènes, d'autres présentent un pouvoir pathogène très important. Parmi ces cocci, les streptocoques du groupe D, appelés aussi streptococcies à entérocoques groupe D, vivent dans l'intestin de l'homme et sont éliminés avec les sels (streptocoques fécaux). La localisation fréquente de l'infection sur les voies urinaires, les autres localisations sont les méninges l'endocard. C'est pour ces raisons que la recherche des streptocoques fécaux dans les eaux de boisson est indispensable [19].

3.3. Les salmonella : La définition des salmonella comme celle de tous les germes de la famille des entérobactéries est basée sur les caractères métaboliques. Les salmonella sont mobiles. La majorité des bactéries de cette espèce sont pathogènes pour l'homme et les animaux. Ces germes provoquent chez l'homme la fièvre typhoïde ou paratyphoïde, transmise d'homme à homme par l'intermédiaire d'aliments ou de boissons contaminés par les déjections. Il suffit chez le non vacciné de l'absorption d'un petit nombre de bactéries pour déclencher la maladie.

3.4. Le vibron cholérique : La famille de vibrionacéae comprend des bacilles incurvés et très polymorphes, mobiles, cultivées sur milieu ordinaire aérobie ou anaérobie (facultatifs), ils traversent en flèche le champ du microscope et en tourbillon, pourvus de capsule et de spore. Cette famille comprend trois genres : le vibron qui est l'espèce type, le vibron cholérique, et la variété ELTOR tous deux responsables du choléra. C'est un germe assez fragile, sensible à la lumière, à la chaleur, au froid, à la dessiccation et aux antiseptiques. Dans la nature il résiste longtemps dans l'eau, aux pluies, dans la boue et dans les égouts. Le vibron cholérique possède l'antigène O somatique glucido-lipido-protéique, thermostable à 100°C.

4. Les maladies d'origine microbienne associées à l'eau : Si vous buvez de l'eau contaminée, vous pourriez être malade et même en mourir. Certains types de bactéries sont une menace à la qualité de l'eau potable et sont responsables des maladies d'origine hydrique (Tab.1):

Tableau 1 : Les maladies d'origine microbienne associées à l'eau [19]

Types de bactéries	Les maladies d'origine microbienne associées à l'eau
Coliformes totaux	Présents dans les excréments d'animaux, sol et la végétation
Coliformes fécaux	Sont responsables de Gastroentérite Infantile (G E I) chez les enfants de moins de deux ans. La diarrhée et vomissements
Streptocoques fécaux	Sont pathogènes pour l'homme (Angine, Scarlatine) et les animaux (Abcès, Mammites).
Clostridium sulfite réducteur	-Tétanos. - Gangrènes. -Entérotoxémies.
Salmonella	-La Fièvre Typhoïde et Paratyphoïde
Vibron cholérique	-Le Choléra

La majorité des micro-organismes pathogènes (virus, bactéries ou protozoaires) pouvant causer des maladies susceptibles de se trouver dans l'eau, proviennent de déjections humaines ou animales. Comme il est techniquement impossible de faire l'analyse de tous les pathogènes, on utilise plutôt des indicateurs microbiologiques qui sont en soi sans danger : les bactéries coliformes totales, les bactéries entérocoques et les bactéries E-Coli. Les coliformes totaux constituent un groupe hétérogène de bactéries d'origine fécale (dont les bactéries E-Coli) et environnementale.

En effet, la plupart des espèces peuvent se trouver naturellement dans le sol et la végétation. Leur détection dans l'eau n'indique pas une contamination fécale ni un risque sanitaire, mais plutôt une dégradation de la qualité bactérienne de l'eau.

Cette dernière peut être attribuée à une infiltration d'eau de surface dans le puits. L'analyse des coliformes totaux permet donc d'obtenir des informations sur la vulnérabilité possible d'une nappe alluviale (comme dans notre cas) à la pollution de surface.

Les bactéries entérocoques sont moins abondantes dans la flore intestinale des humains et des animaux que les bactéries E.Coli, mais elles ont l'avantage d'être plus persistantes dans l'environnement. Cependant, certaines espèces ne sont pas d'origine fécale et se trouvent naturellement dans le sol ou la végétation. La détection des bactéries entérocoques dans l'eau d'un puits peut indiquer une contamination fécale ou une infiltration d'eau de surface.

Les bactéries E-Coli font partie du groupe des coliformes totaux. C'est une espèce très abondante dans la flore intestinale humaine et animale, et c'est aussi la seule qui soit strictement d'origine fécale, elles sont considérées comme le meilleur indicateur de contamination fécale. Leur présence dans l'eau signifie que cette dernière est contaminée par une pollution d'origine fécale et qu'elle peut donc contenir des micro-organismes pathogènes.

La gastro-entérite est la maladie la plus fréquente associée à l'ingestion d'eau contaminée par des matières fécales. Bien que cette maladie soit souvent sans gravité elle peut parfois entraîner des conséquences très graves sur la santé. D'autres maladies plus rares comme les hépatites ou les méningites peuvent aussi être provoquées par l'ingestion d'eau contaminée. Ce risque concerne non seulement les membres d'une famille qui consomment l'eau d'un puits, mais aussi tous leurs visiteurs [19]

5. Analyse bactériologique : Les analyses bactériologiques des eaux naturelles nécessitent de suivre une technique de prélèvement très sophistiquée ainsi que des méthodes d'analyse spécifique de chaque paramètre.

6. Résultats d'analyse : Dans la wilaya de Tébessa, seul le laboratoire d'hygiène de la wilaya (DDS) est capable de réaliser les analyses des eaux potables et usées.

7. Interprétation des résultats bactériologiques

7.1. Courbe de variation des coliformes (Totaux, Fécaux) : nous avons utilisé les données recueillies pour l'établissement d'une courbe qui présente la variation des coliformes totaux et fécaux, et les germes aérobies en fonction du type d'eau (eaux de surface et souterraine) (Fig.9) [78,79,80,81]

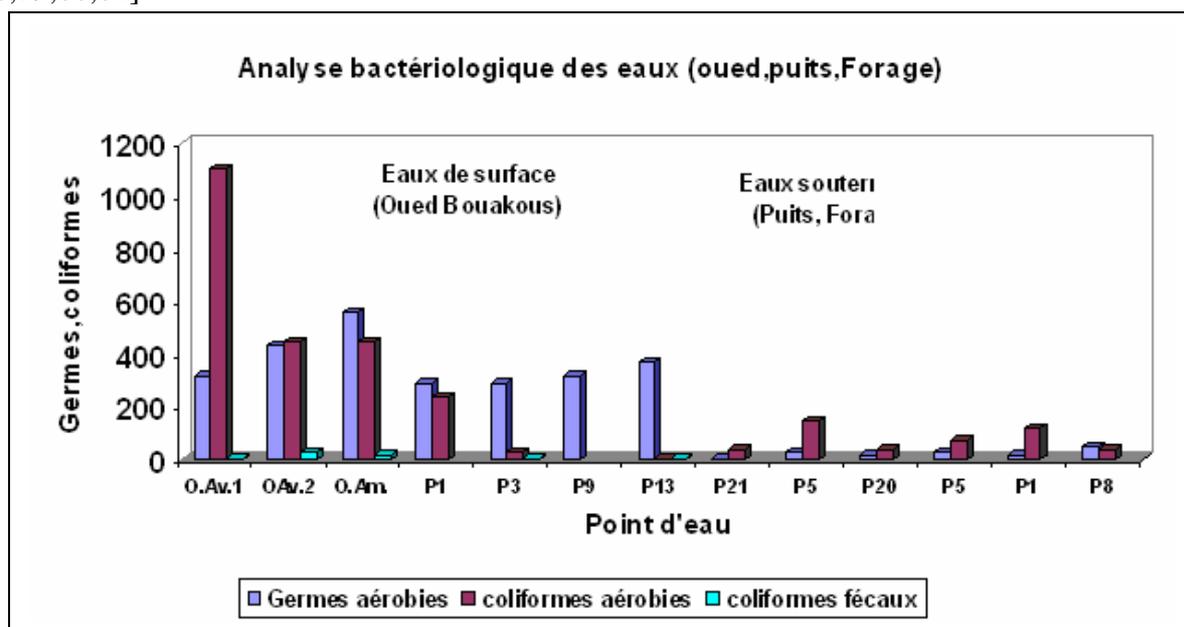


Figure 9 : courbe de variation des germes aérobies, coliformes totaux et fécaux en fonction des points d'eau [78,79,80,81]

Les concentrations maximales de coliformes totaux et fécaux dans les eaux de surface s'échelonnent entre 9 et 1100 /100ml d'eau. Ces concentrations deviennent faibles dans quelques puits (9-240 ml/100ml d'eau) qui captent la nappe alluviale Tébessa- Hammamet, puis elles deviennent très faibles voire nulles dans les forages de grande profondeur.

Les eaux de cette nappe ont de fortes densités de bactéries fécales et pathogènes, mais cette densité subite d'amples fluctuations spatiales. La concentration des coliformes diminue avec la profondeur de l'eau. Autrement dit, les eaux souterraines de la nappe phréatique de la région d'étude apparaissent plus vulnérables à la pollution bactériologique que le sommet de la nappe qui est plus proche de la surface du sol ce qui laisse apparaître que :

- les eaux de ruissellement pourraient favoriser la pollution de la nappe en entraînant dans le sol et jusqu'aux eaux souterraines de nombreuses particules et cellules polluantes;
- le déversement des eaux usées dans la nappe sans traitement préalable et la relation directe entre la nappe et l'oued constituent une source de pollution permanente;
- l'irrigation par les eaux usées surtout dans les zones aval de oued Chabro où la relation oued nappe est très forte constitue aussi une source de pollution très dangereuse [78,79,80,81]

8. Calcul de l'indice de qualité microbiologique (IQM) : Par l'application de la méthode établie par Bovesse et Depelchin (1980), nous avons calculé la moyenne des numéros de classes selon les données des tableaux (Tab.3,4) [78,79,80,81]:

Tableau 2 : Classement des paramètres microbiologique

Classe n°	Bact. tot./ml	colif. f./ml	strepto. f./ml
5	<2000	<100	<5
4	2000-9000	100-500	5-10
3	9000-45000	500-2500	10-50
2	45000-360000	2500-20000	50-500
1	>360000	>20000	>500

Tableau3: Indice de Qualité Microbiologique

IQM	Contamination fécale
4,3-5,0	nulle
3,5-4,2	faible
2,7-3,4	modérée
1,9-2,6	forte
1,0-1,8	très forte

Tableau 4 : Application de la méthode de calcul de l'indice de qualité Microbiologique

Paramètres	Date de prélèvement	
Bactériologiques		IQM=1+2+3
Recherchés		
Point d'eau		
P1	10/05/2004	
P3	10/05/2004	5
P9	10/05/2004	5
P13	10/05/2004	5
O.Av.1	10/05/2004	5
OAv.2	10/05/2004	5
O.Am.	10/05/2004	5
P21	25/06/2005	5
P5	25/06/2005	5
P20	25/06/2005	5
P5	02/07/2005	5
P1	02/07/2005	5
P8	02/07/2005	5
FQR5	15/01/2006	5
FAC1	15/01/2006	5

F1	15/01/2006	5
FYS45bis	15/01/2006	5
F1	13/05/2006	5
FYS45bis	13/05/2006	5
F1	03/06/2006	5
FAC1	03/06/2006	5
Normes algériennes		5

Selon cette méthode de classification, l'indice de qualité microbiologique est supérieur à 5, donc l'eau se classe dans la catégorie qui indique que la pollution microbiologique est nulle. On peut dire que l'eau est de bonne qualité bactériologique que se soit pour l'eau de surface ou souterraine. Par contre si on compare les résultats avec les normes algériennes (Tab.2), on trouve que les eaux de surface, au niveau de l'oued de Bouakous, ainsi que quelques puits, au niveau de la zone d'étude (Ain chabro et Hammamet), présentent des concentrations en coliformes totaux et fécaux non recommandées. Indiquant par conséquent leurs contamination bactériologique [78,79,80,81]

9. Conclusion

Nous avons constaté la contamination des ressources hydriques dans la région d'étude (surface, souterraines) par l'existence des coliformes totaux et fécaux. L'origine de la pollution bactériologique de ces points d'eau varie d'un site à l'autre et est causé par divers facteurs humains, animaux ou mixte.

Il faut signaler que les eaux usées rejetées dans la nature sans traitement préalable constituent une source de pollution permanente et principale. Selon les normes de l'OMS et les normes algériennes relative aux eaux de boissons, les micro-organismes isolés devraient être absents. Les consommateurs de ces eaux s'exposent par conséquent à des risques sanitaires à court terme. Contre cela, on recommande de protéger au mieux les ressources en eaux (sources, puits, forages...) de toute pollution extérieure.

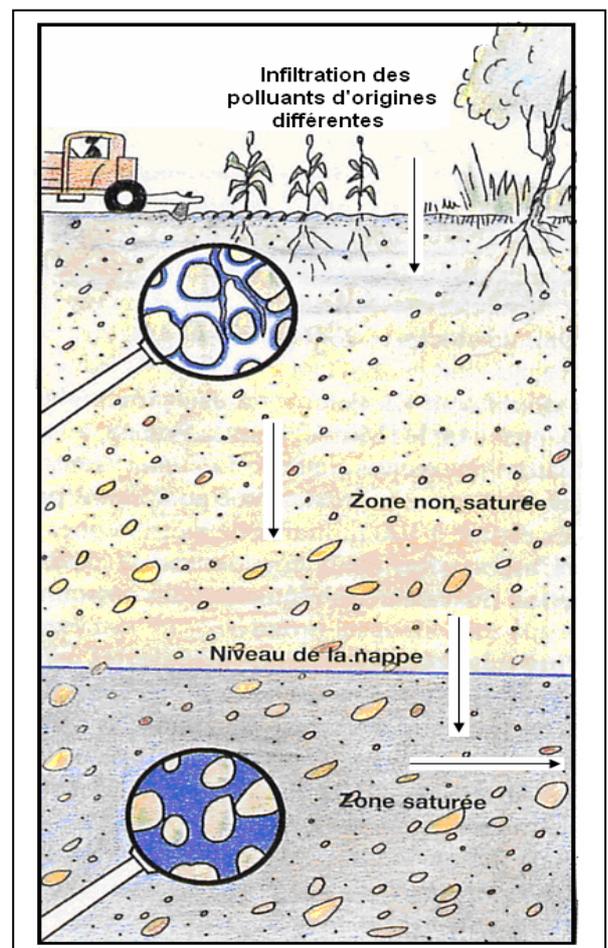
3. Vulnérabilité à la pollution et protection des ressources en eau

1. Introduction

La vulnérabilité d'une nappe à la pollution dépend du type de nappe (libre ou captive), de l'épaisseur de la zone non saturée et de sa composition lithologique, et du mode de circulation de l'eau dans l'aquifère. Les nappes libres sont les plus vulnérables: les polluants d'origine superficielle peuvent diffuser librement dans le sol et la zone non saturée jusqu'au niveau piézométrique; d'autre part, la fluctuation verticale saisonnière du niveau piézométrique aboutit à 'rincer' les particules de la zones non saturée et entraîner les substances qui y sont adsorbées. Pour atteindre une nappe libre en milieux poreux, les polluants transportés par les eaux d'infiltration doivent franchir de nombreux obstacles (Fig.1):

- **le sol**, où l'activité chimique et microbiologique est intense (oxydation, réduction...). De nombreux corps sont modifiés chimiquement, les polluants organiques peuvent être métabolisés et minéralisés. Néanmoins, cette biodégradation peut aboutir à des métabolites plus au moins toxiques. Les complexes argilo humiques peuvent fixer de nombreux corps minéraux et organiques par adsorption ;
- **la zone non saturée** : Comme le sol, elle joue un rôle dans la filtration et la rétention de certaines substances. Cette action est d'autant plus efficace que la granulométrie est plus faible ;;
- **la zone saturée** : La filtration se poursuit dans le milieu poreux de la nappe; le polluant est dilué dans la masse d'eau.

Figure 1 : Infiltration des polluants dans la zone non saturée et la zone saturée[36].



On voit que la protection de la nappe sera d'autant meilleure que le sol et la zone non saturée sont épais, que leur granulométrie est fine, et que la vitesse de percolation de l'eau dans la nappe est faible. Dans le cas de la nappe alluviale de Ain chabro-Hammamet, nous avons trouvé que l'épaisseur de la zone non saturée est très importante allant jusqu'à 550m en quelques zones (Fig.3) En revanche, ce type de nappe une fois contaminée par un polluant le reste longtemps.

Nous avons montré dans la partie précédente qu'il y a une relation directe entre la nappe alluviale et l'oued et que la qualité de son eau dépende de celle de l'oued et la source de Bouakous. Les matériaux couvrant le fond de l'oued jouent le rôle de filtre et la pollution des eaux souterraines est favorisée par certains aménagements et pratiques comme:

- Les interventions qui favorisent l'infiltration dans la nappe, comme les forages de puits sans précaution, l'ouverture de gravières, les puits perdus pour infiltrer les eaux usées, etc. ;
- La mauvaise gestion des eaux de ruissellement, suite à l'imperméabilisation des surfaces (ville, routes et au drainage agricole, et des eaux usées ;
- La modification des pratiques agricoles, comme le remplacement de la prairie par des cultures intensives (remembrement, suppression des haies, du bocage, sols à nu pendant l'hiver);
- Les élevages intensifs, nourris de farines de soja ou animales et de maïs fourrage, produisant une accumulation locale d'excréments difficiles à gérer.

Il faut signaler que tous ces types de pollution existent dans la zone d'étude, et favorise une pollution ponctuelle des ressources hydriques, qu'elles soient, superficielles ou souterraines [1,19,36]

2. Principales origines des pollutions

- **origine domestique** : Dans le cas d'un assainissement collectif ou individuel défectueux, des substances indésirables contenues dans les eaux vannes et les eaux ménagères peuvent être transférées à la nappe (matières organiques, détergents, solvants, antibiotiques, micro-organismes, etc.) Le cas se produit avec les puits perdus, l'assainissement individuel avec infiltration dans le sol mal conçue ou mal dimensionnée, les stations d'épuration urbaines surchargées, etc. Les ordures ménagères accumulées dans des décharges sauvages ou non mises à la norme (centre d'enfouissement technique) libèrent également des lixiviats riches en polluants (Fig.2) ;
- **origine industrielle** : Les polluants d'origine industrielle sont très variés selon le type d'activité: substances organiques banales, produits organiques de synthèse, hydrocarbures, sels minéraux, métaux lourds, etc. Les pollutions sont exceptionnelles mais encore trop souvent chroniques (fuite de réservoirs, de canalisations, etc.) Un cas particulier est celui des exploitations minières. L'extraction des granulats en plaine alluviale met en contact l'eau de la nappe avec les polluants éventuels ;
- **origine agricole** : La pollution est étendue dans l'espace et dans le temps; elle est chronique et concerne de grandes surfaces. En effet, les pratiques actuelles des cultures et de l'élevage influencent fortement le régime et la qualité des eaux. L'utilisation massive des engrais et des produits chimiques de traitement des plantes détruit la vie dans les rivières et rend impropres à la consommation humaine, et parfois animale, les eaux superficielles et souterraines [31,36]. Le transfert des engrais et pesticides à la nappe se fait soit par infiltration sur l'ensemble de la surface cultivée, par rejet dans des puits perdus, des gouffres et des bétoires. La pratique de l'irrigation accélère le transfert. Les élevages intensifs de bovins et volailles produisent une grande quantité de déjections azotées qui doit être stockée en réservoirs étanches avant d'être utilisée comme engrais (ou comme aliments) ;
- **origine urbaine et routière** : Les risques de pollution apparaissent à la construction des réseaux routiers puis à leur exploitation (salage en hiver, hydrocarbures, métaux lourds libérés par les véhicules, substances dangereuses échappées par accident, etc.) En ville, on trouve, en plus des polluants de la voirie, la contamination possible des nappes par les eaux usées (raccordement incomplet ou défectueux, mauvais état des réseaux, surcharge ou

mauvais fonctionnement des stations d'épuration, en particulier absence de traitement), par les fuites de cuves de carburants (essence, fioule), par les cimetières. L'imperméabilisation des surfaces (routes, rues, parkings, toits) produit une forte quantité d'eau de ruissellement chargée en produits polluants divers (hydrocarbures, déjections d'animaux, etc.) Ces eaux pluviales polluées ne doivent en aucun cas être transférées à la nappe.

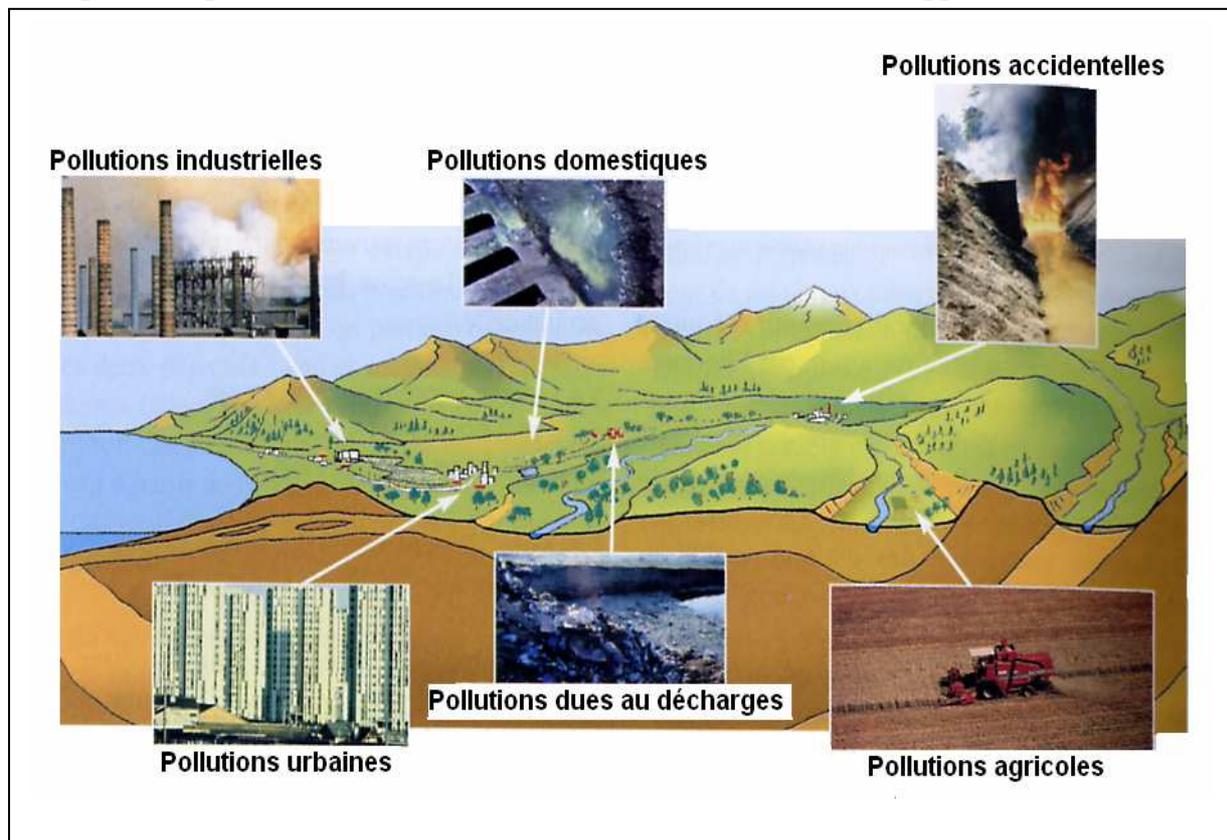


Figure 2 : Principales causes de pollution [36]

3. Indice de contamination de la nappe alluviale Tébessa Hammamet : Pour étudier la contamination des eaux de la nappe, nous avons utilisé une indice de contamination utilisant l'ensemble des éléments chimiques considérés comme étant d'origine anthropique.

$$I.C = [Na^+] + [SO_4^{-2}] + [Cl^-] + [NO_3^-] \quad (1)$$

Les éléments chimiques analysés parus en abondance et qui semblent liés au lessivage des roches magmas et à l'activité humaine (élevage, épandage d'engrais) sont : Na^+ , SO_4^{-2} , Cl^- , NO_3^- . En admettant des intervalles de classes en mg/l pour chaque élément et en les additionnant, on peut repérer les indices de contamination. Plus cet indice est élevé et plus le point de prélèvement est contaminé donc pollué (Pr. Khérici N., 1993)

Tableau 1 : Classement des indices de contamination (Pr. Khérici N., 1993)

Classe/Ions	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Na^+	<250	250-500	500-750	750-1000	>1000	-	-	-	-
SO_4^{-2}	<250	250-500	500-750	750-1000	>1000	-	-	-	-
Cl^-	<250	250-500	500-750	750-1000	>1000	-	-	-	-
NO_3^-	<15	15-25	25-35	35-45	45-55	55-65	65-75	75-85	85-95

Pour les nitrates, il est clair que la classe est très importante car leurs dérivées sont reconnues plus toxique que les autres éléments.

Nous avons classé nos résultats comme suit :

- Si I.C entre 4 et 7 : zone dite de faible vulnérabilité ;

- Si I.C varie entre 8 et 11 : zone dite de moyenne vulnérabilité ;
- Si I.C varie entre 12 et 19 : zone est de forte vulnérabilité.

Nous avons tracé trois cartes de répartition des indices de contamination dans la région d'étude, selon les périodes de prélèvement :

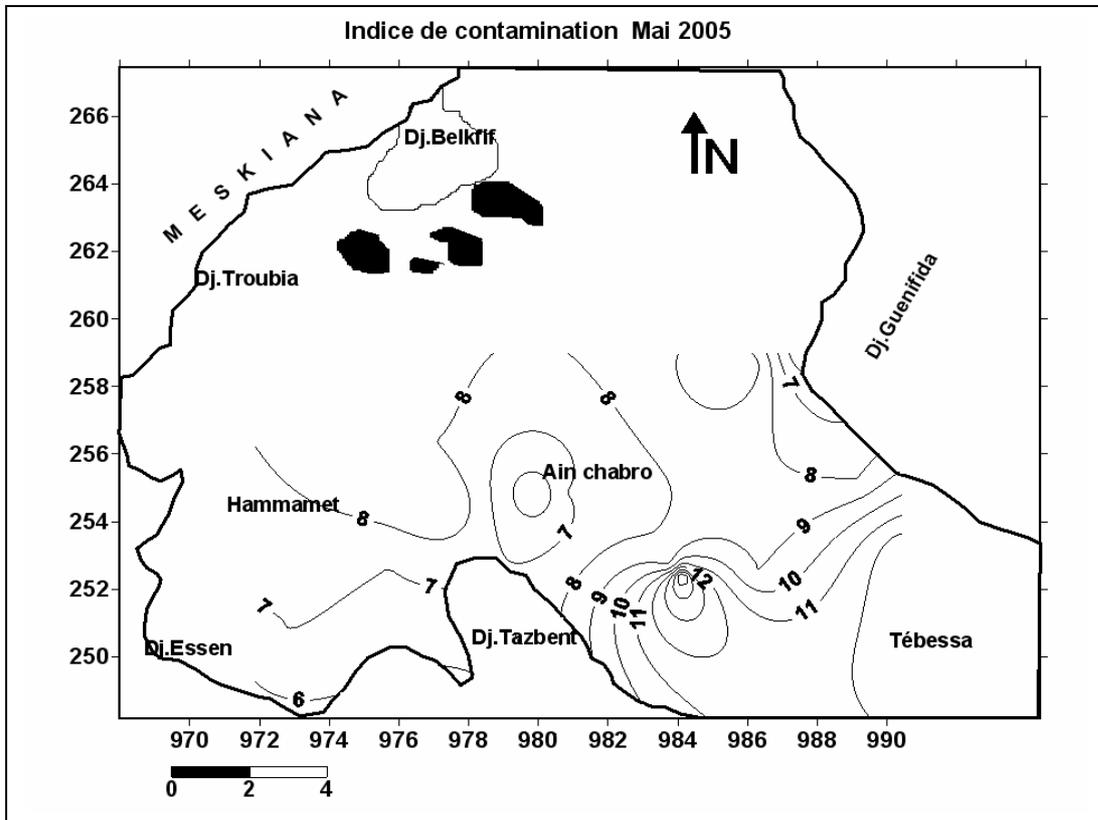


Figure 3 : Carte d'indice de contamination pour la campagne de Mai 2005

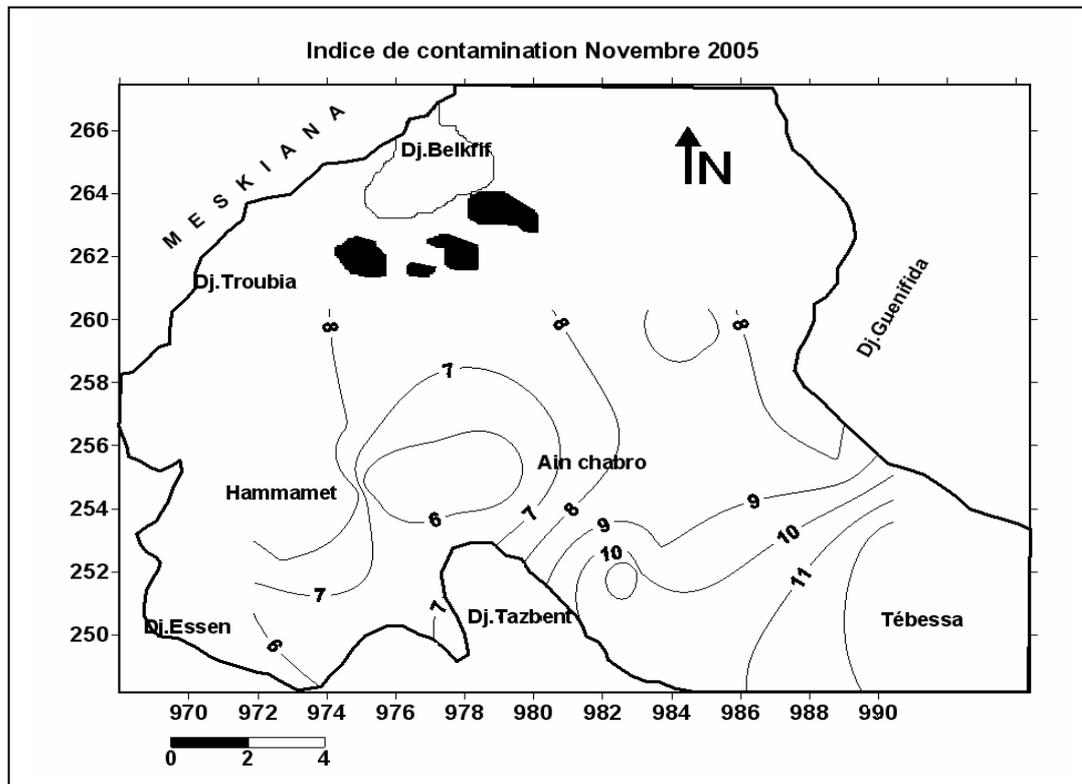


Figure 4 : Carte d'indice de contamination pour la campagne de Novembre 2005

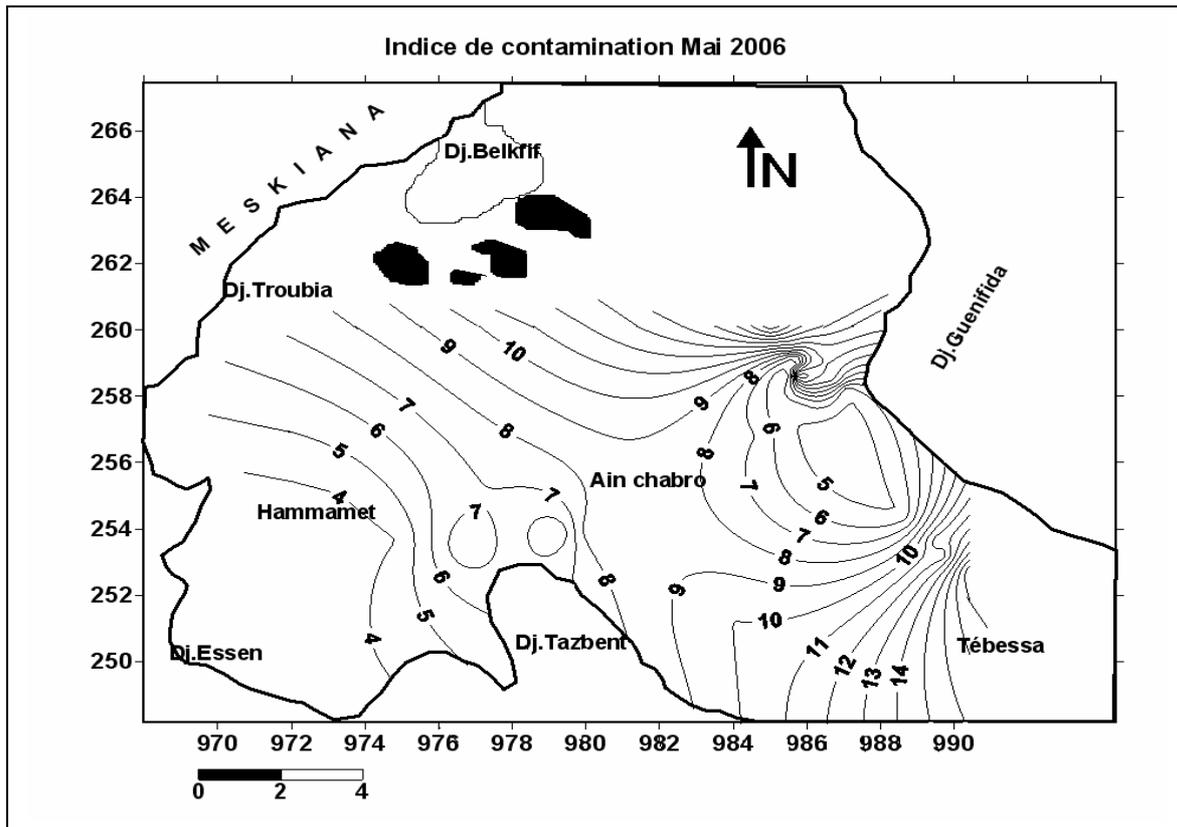


Figure 5 : Carte d'indice de contamination pour la campagne de Mai 2006

Selon les cartes établies (Fig.3,4, 5), on peut diviser la région d'étude en trois zones distinctes selon l'intensité de l'indice de contamination calculé. Pour cela, on envisage généralement :

- **La zone de faible indice de contamination (3-6)**, qui caractérise la zone de Hammamet, dans la partie ouest de la ville de Tébessa. Cette zone est faiblement vulnérable à la pollution éventuelle.
- **La zone de moyenne indice de contamination (6-9)** qui caractérise la zone de Ain chabro, dans la partie centrale de la plaine de Tébessa. Elle est donc moyennement vulnérable à la pollution ;
- **La zone de forte indice de contamination (10-19)**, qui caractérise la partie Est de la plaine de Tébessa. Cela montre bien que cette partie de la plaine est très exposée et plus vulnérable à la pollution. Elle nécessite donc des mesures de protections très rapides.

4. Pouvoir épurateur du sol contre les pollutions éventuelles

4.1 Rôle protecteur des sols : Le sol constitue un puissant moyen d'épuration et de recyclage des eaux. Les argiles, les hydroxydes et la matière organique adsorbent les cations (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , Na^+ , métaux lourds) et certaines molécules organiques. Les phosphates et les atrazines sont bien fixés par les particules du sol; ils peuvent être néanmoins entraînés avec ces particules (érosion des sols à nu). Le contenu microbiologique du sol peut épurer le sol de ses substances indésirables: minéralisation des composés azotés, dénitrification, dégradation des micropolluants organiques (pesticides). Les germes pathogènes introduits dans le sol sont éliminés quand les conditions de survie sont défavorables [49,50,51,53]

4.2 Rôle épurateur de la couverture végétale et des organismes : Les plantes accumulent des éléments minéraux et servent donc de zone de stockage, en particulier pour les nitrates. Les cultures d'hiver permettent de stocker l'excès d'azote, donc à éviter son transfert à la nappe. La végétation

des zones humides et des bords de rivières ont un effet épurateur remarquable (dénitrification dans les zones hydro morphes anaérobies).

4.3 Autoépuration biologique des eaux souterraines : Les organismes vivants et non toxiques (bactéries, petits invertébrés) sont présents dans les eaux souterraines même à grande profondeur. Ils peuvent métaboliser les polluants introduits dans la nappe. Les polluants organiques toxiques comme les polychlorobiphénols (PCB) sont lentement transformés. Les nitrates sont détruits en milieu anaérobie (cas des nappes captives).

4.4. Estimation du pouvoir épurateur (Méthode de Rhèse, 1977) : une méthode empirique mise au point par Rehse consiste à estimer dans quelle mesure un polluant déversé en surface du sol verra sa teneur diminuer après un parcours vertical jusqu'à la nappe, puis après un parcours horizontal dans la nappe jusqu'au point de prélèvement. Pour cela des index sont attribués aux différents types de roches qui sont implicitement liés à la perméabilité et au pouvoir de rétention des constituants des matériaux, et qui tiennent compte de l'épaisseur. Les quatre premiers mètres qui constituent la frange de terrain pouvant être affectés par des travaux de terrassement ou canalisation ne sont pas pris en compte dans le calcul. Les paramètres physiques et hydrodynamiques des différents matériaux ayant servi à calculer les épaisseurs H et les distances L sont donnés dans les tableaux suivants (Tab. 2,3)[49]:

Tableau 2 : Pouvoir épurateur du sol dans la couverture (sol+zone non saturée) (selon REHSE, 1977)[49]

Description du matériau	H (cm)	I = 1/H
Humus et argiles (5 à 10%)	1.2	0.8
Argiles, limons argileux, sables très argileux	2	0.5
Silt argileux à silt	2.5	0.4
Silt sablés silteux, sable peu silteux	3 - 4.5	0.33 - 0.22
Sables fins à moyen	6	0.17
Sables moyens à grossier	10	0.1
Sables grossiers	15	0.07
Gravier silteux riche en sables et argiles	8	0.13
Gravier peu silteux beaucoup de sables	12	0.08
Gravier fin à moyen riche en sables	25	0.04
Gravier moyen à grossier peu de sable	35	0.03
Galets	50	0.02

Tab 21 - Pouvoir épurateur du sol dans la couverture (sol + zone non saturée) (D'après REHSE 1977)

Description du matériau	H (cm)	I = 0,5/H
Marnes	10	0.05
Grès avec roches argileuses, argiles, micaschiste	20	0.025
Basaltes et roches volcaniques	30	0.017
Arkose, grès argileux ou silteux	50	0.01
Granites, grandiorite, diorite, synérite	70	0.07
Quartzite, grès à silex	100	0.005
Calcaire	200	0.0025

Tab.23 - Pouvoir épurateur des roches (d'après BÖLSENKÖTTER et al. 1984).

Description du matériau	L (m)	Ia = 1/L
Gravier peu siliceux, bcp. de sables	a- 100	0.01
	b- 150	0.007
	c- 170	0.006
	d- 200	0.005
Gravier fin à moyen, riche en sable	a- 150	0.07
	b- 200	0.005
	c- 220	0.0045
	d- 250	0.004
Gravier moyen à grossier, peu de sable	a- 200	0.05
	b- 250	0.004
	c- 270	0.0037
	d- 300	0.0033
Gravier, galets	a- 300	0.0033
	e- 340	0.0029
	f- 360	0.0028
	g- 400	0.0025

Tab.24 - Pouvoir épurateur du sol dans l'aquifère (d'après REHSE 1977)
H : épaisseur de la couche de sol nécessaire pour une épuration
: Index caractéristique associé à chaque type de terrain

Tableau3 : Pouvoir épurateur du sol dans l'aquifère (REHZE, 1977)[49]

Le pouvoir épurateur des terrains est calculé par : $M_x = (M_d + M_r)$ avec :

M_x : pouvoir épurateur sur la totalité du transfert ;

M_d : pouvoir épurateur sur le trajet vertical ;

M_r : pouvoir épurateur sur la distance horizontale.

Sur le trajet vertical, le pouvoir épurateur est égal à :

$$M_d = h_1 i_1 + h_2 i_2 + h_3 i_3 + \dots + h_n i_n \quad (2) \text{ avec:}$$

h_1, h_2, h_3, h_n : hauteur des différentes catégories de terrains rencontrées;

i_1, i_2, i_3, i_n : des index correspondants au tableaux (Tab.2,3)

- Si M_d est supérieur à 1, cela signifie que l'épuration est totale dans les couches de couverture et que la délimitation d'un périmètre de protection rapproché n'est pas nécessaire selon Rehse ;
- Si M_d est inférieur à 1, la dépollution n'est pas totale, et doit se poursuivre dans la roche aquifère lors du transfert horizontal.

Soit $M_r = 1 - M_d$ le pouvoir épurateur dans l'aquifère

La distance l à parcourir horizontalement pour une épuration total sera : $L = M_r / I_a$

Où I est l'index correspondant au matériau aquifère (Tab.7)

L correspondrait dans ce cas à la limite de la zone de protection rapproché s'il n'y a pas de couverture, toute épuration doit se faire horizontalement et M_r doit être égal à 1.

4.5. Calcul du pouvoir épurateur du sol de la région d'étude : nous avons appliqué la méthode de Rehse pour déterminer le pouvoir épurateur du remplissage quaternaire de la région d'étude. Toutes les valeurs de M_d calculées sont supérieures à 1 ce qui signifie que le pouvoir épurateur du sol, sur le trajet vertical, est total et la nappe est bien protégée contre les pollutions éventuelles.

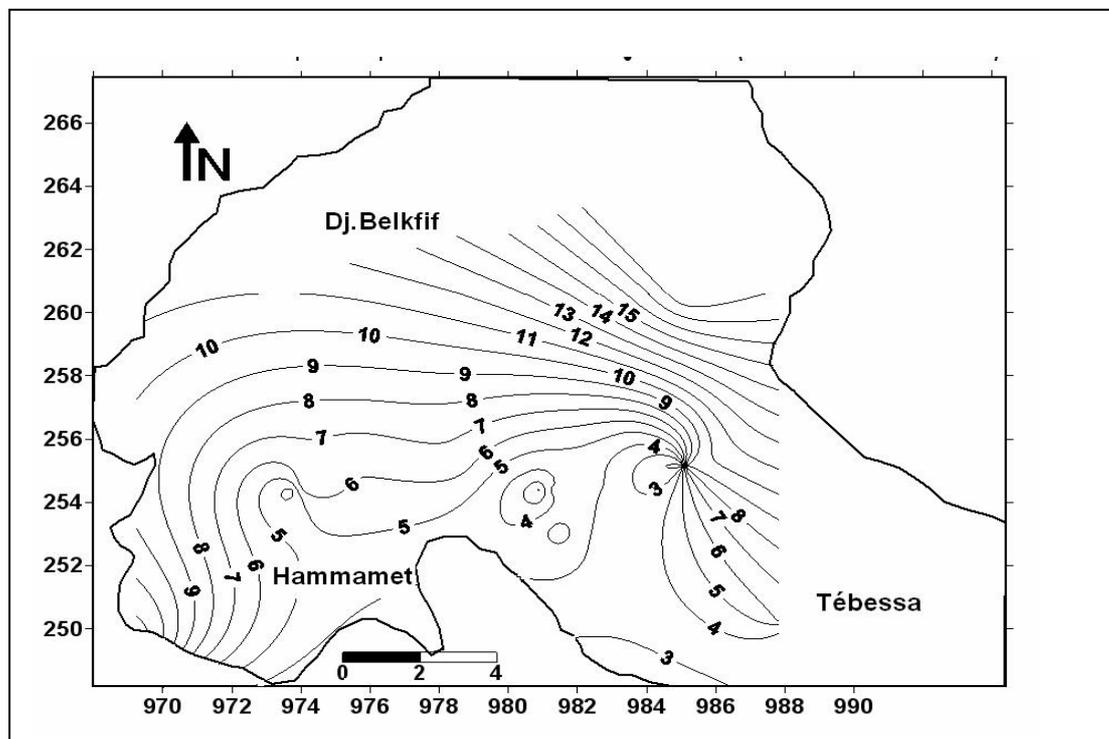


Figure 6 : Carte du pouvoir épurateur de la zone non saturée dans la région d'étude

La carte du pouvoir épurateur établie (Fig.6) a montré que le pouvoir épurateur du remplissage quaternaire est satisfaisant dans toute la plaine. Ceci se corrèle bien avec la carte du remplissage quaternaire, qui montre que son épaisseur est très importante et atteint 550m (Fig.7). Les résultats obtenus par la méthode de RHESE sont tous supérieurs à 1 ($M_d > 1$) et ils montrent que la nappe est bien protégée par la zone non saturé épaisse. Suite à ces données nous pouvons dire que la pollution des eaux de la nappe est causée principalement par les rejets des eaux usées non traitées, et ce au niveau des points de contact ouverts sur la nappe (par exemple des puits abandonnés, connexion oued nappe, etc.) donc les points de pollution sont ponctuels en surface.

Cependant, on peut protéger la nappe par simple contrôle des décharges publiques, des eaux usées, des déchets agricole, et par l'application de périmètres de protection autour des captages d'eau.

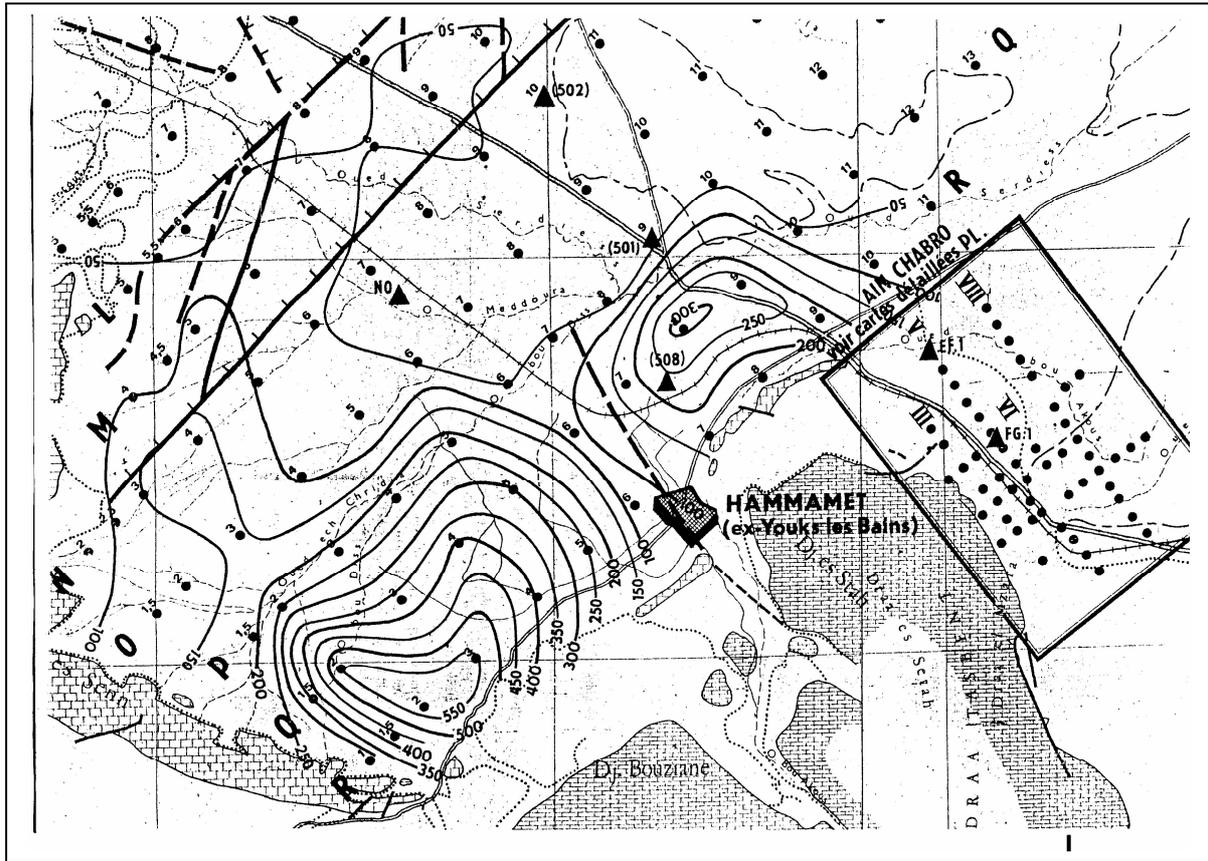


Figure 7: Carte du remplissage quaternaire de la plaine Tébessa Hammamet [DHW. Tébessa]

5. Protection des ressources en eaux

5.1. Notions de périmètres de protection : La présence d'un captage ou d'un champ captant sur lequel s'exerce un débit de pompage provoque l'apparition d'un cône de dépression du niveau de la nappe, ce qui a pour effet d'attirer les particules d'eau polluée. La zone à protéger en priorité contre une pollution due à une activité humaine se situe en amont du captage et à l'intérieur d'une zone dite de captage. Cette zone est définie d'une manière théorique par les lignes de courant des eaux souterraines.

La notion des périmètres de protection est largement traitée dans la littérature internationale (49,78,80,81,82). Au niveau national, la loi (Journal officiel de la république algérienne N°60 de 30 Rajab 1426,4 septembre 2005, Article 30-42) prévoit trois zones de protection des ressources en eau (forages, champs captant, barrages, sources, etc.)(Fig.8) :

- **La zone de protection immédiate** doit garantir qu'aucune substance polluante ne parvienne au captage sans que les phénomènes d'épuration aient pu s'exercer. Les dimensions de cette zone varient de 10 à 20 m autour des captages d'eau souterraine. Elle doit être acquise en toute propriété et clôturée par l'exploitant et aucune activité polluante n'y est admissible ;
- **La zone de protection rapprochée** doit protéger les eaux souterraines d'un captage ou d'un champ captant contre la pollution bactériologique et donner une marge de sécurité pour une intervention en cas de pollution chimique ou accidentelle. La délimitation de cette zone dépend surtout du contexte géologique et hydrogéologique. Elle se trouve en général sur l'isochrone 50 jours (zone correspondant à un temps de transfert de 50 jours, permettant la disparition des bactéries pathogènes) ;
- **La zone de protection éloignée** permet d'assurer la protection des ressources en eau vis-à-vis des polluants à long terme, notamment vis-à-vis des pollutions peu dégradables

(pollutions chimiques et radioactives). Cette zone se trouve entre la limite de la zone de protection rapprochée et la limite de l'aire d'alimentation de la nappe aquifère.

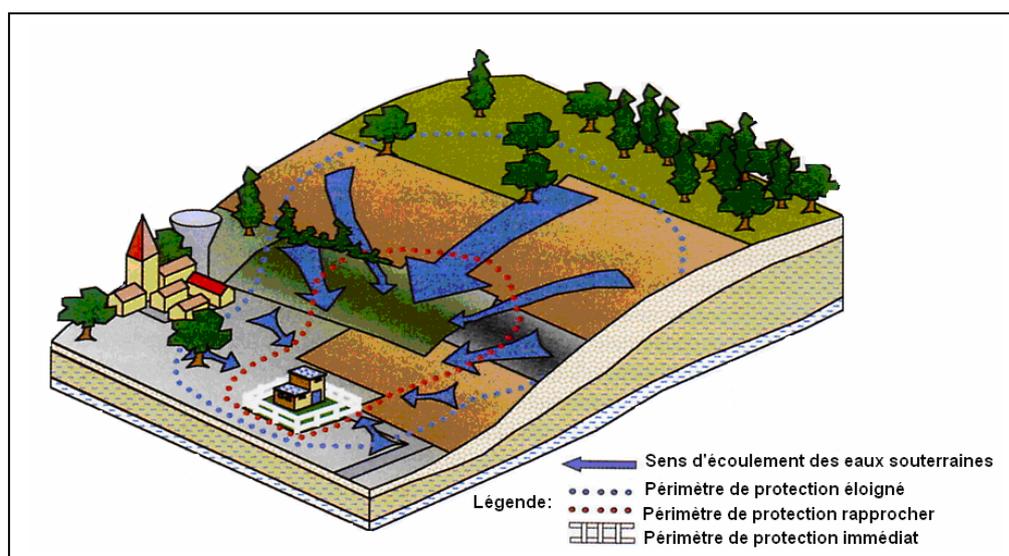


Figure 8 : Principe de trois périmètres de protection des captages des eaux [36,53]

Cependant, on peut dire que tant que le pouvoir épurateur du remplissage quaternaire de la zone saturée, est important dans toute la plaine, et que la nappe est bien protégée contre des pollutions éventuelles. Il est important, de renforcer cette protection, dans la mesure du possible, par l'application des périmètres de protection immédiats autour des forages surtout ceux qui ne sont pas entourés par des sièges métalliques appropriés.

6. Conclusion

Nous avons constaté qu'il y a trois zones distinctes du point de vue de leur vulnérabilité à la pollution, ce sont :

- **La zone de faible indice de contamination (3-6)**, qui caractérise la zone de Hammamet, dans la partie ouest de la ville de Tébessa. Cette zone est faiblement vulnérable à la pollution éventuelle ;
- **La zone de moyenne indice de contamination (6-9)**, qui caractérise la zone de Ain chabro, dans la partie centrale de la plaine de Tébessa. Elle est donc moyennement vulnérable à la pollution ;
- **La zone de forte indice de contamination (10-19)**, qui caractérise la partie Est de la plaine de Tébessa. Cela montre bien que cette partie de la plaine est très exposée et plus vulnérable à la pollution. Elle nécessite donc des mesures de protections très rapides.

Notons qu'au niveau de ces zones, l'épaisseur du remplissage quaternaire est importante et joue son rôle de protection. La carte du pouvoir épurateur établie a bien montré cette constatation. La nappe est généralement protégée, et la pollution des eaux de la nappe est causée principalement par les rejets des eaux usées non traitées, au niveau des puits abandonnés, et aux connexions oued/nappe.

Afin de garantir la qualité de l'eau distribuée à la population, on peut recommander de protéger la nappe par simple contrôle des décharges publiques, des eaux usées, des déchets agricole, et par l'application des périmètres de protection autour des captages d'eau. La protection à réaliser au moyen des périmètres est une protection complémentaire à celle, plus générale, prévue par la législation en vigueur sur les déversements, rejets, écoulements, dépôts directs ou indirects d'eau ou de matière. Il s'agit là de préserver les points de prélèvement d'eau des risques de pollution

susceptibles de résulter d'installations diverses établies à leur proximité. Cette protection est alors réalisée par l'interdiction ou la réglementation de certaines activités sur les terrains situés autour des points de prélèvement.

Troisième Partie

Amélioration en quantité et en qualité des eaux de la nappe alluviale Ain chabro-Tébessa

I. Gestion active des aquifères par la recharge artificielle (Bibliographie)

1.Introduction : L'eau est l'élément de base de la vie sur la planète. C'est la raison pour laquelle l'homme a tenté de maîtriser cette ressource primordiale. Malheureusement, depuis quelques décennies, l'action de l'homme dégrade de plus en plus l'environnement, surtout les ressources hydriques.

De plus, l'accroissement exponentiel de la population et des activités industrielles et agricoles au cours de ce siècle a entraîné dans certaines régions une pénurie quantitative et qualitative des eaux mobilisables. La réalimentation de nappe est un procédé largement répandu de gestion active d'aquifère.

Cette technique a énormément évolué ces dernières années. Elle est pratiquement utilisée dans tous les pays et s'inscrit dans une gestion active à long terme du patrimoine hydrogéologique.

Avant de parler en détail de la technique de recharge artificielle et de ses conditions, il est important de vous présenter quelques informations sur les modalités d'alimentation naturelle des nappes [9,24]

2. L'alimentation naturelle des aquifères : Les réserves en eau des aquifères sont constamment renouvelées par le cycle de l'eau. Certains processus tels que les infiltrations à partir des cours d'eau superficiels jouent un rôle dans cette approvisionnement mais la majeure partie est due aux précipitations efficaces, c'est-à-dire à la fraction d'eau qui arrive à la nappe après déduction des pertes par évapotranspiration et ruissellement (Fig.1).

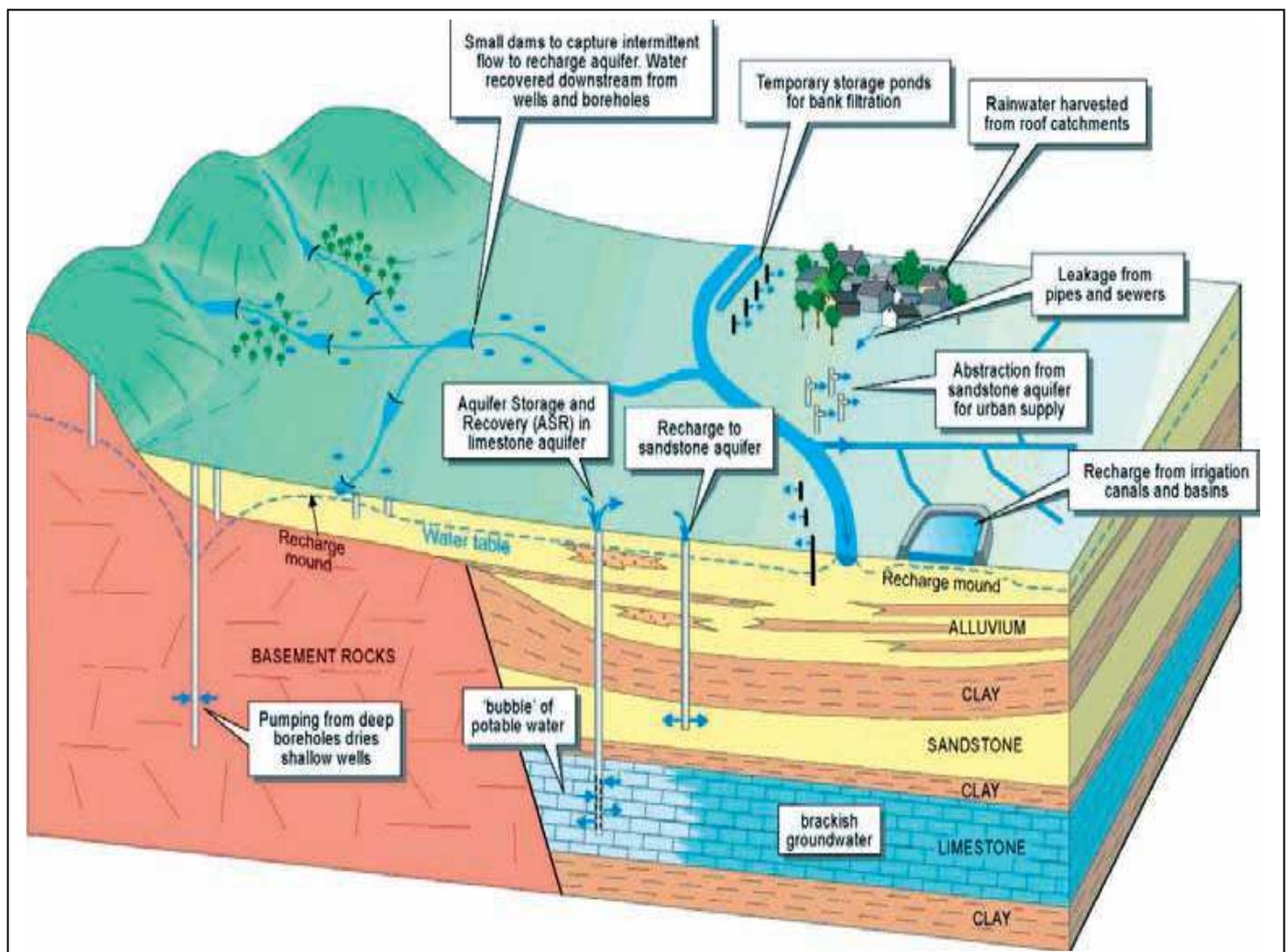


Figure 1: Diagramme des différents types de recharge naturelle d'une nappe aquifère [26,27,28,29]

3. Alimentation artificielle des nappes : La recharge artificielle est le procédé qui consiste à introduire de l'eau dans une formation perméable et ce par l'intermédiaire d'un dispositif aménagé à cet effet. Le devenir de la gestion active des aquifères par réalimentation artificielle est très encourageant dans la mesure où les barrages perdent de leur popularité. Ainsi le stockage et l'épuration en nappe deviennent une alternative intéressante pour faire face aux besoins en eau toujours croissants [9,24,26,27,28,29].

3.1. Objectifs et applications : On peut classer ses applications en 3 catégories principales [9,24,26,27,28,29] :

3.1.1. Modification de la qualité des eaux :

Il existe deux états de modifications importantes :

a. Épuration : les stations de captage d'eau mettent à profit l'épuration bactériologique naturelle dont l'eau de la rivière est l'objet pendant sa filtration lente à travers les alluvions sablo-graveleuses. Cette filtration peut également entraîner une épuration chimique par adsorption (actions de contact entraînant la dégradation de composés peu stables) et échanges d'ions.

Des études approfondies sur le pouvoir épurateur des formations aquifères conduiraient peut-être à certains développements de l'alimentation artificielle. Cela est nécessaire car des produits de synthèse de toute sorte (détergents, herbicides, insecticides, etc.) sont de plus en plus couramment utilisés et rejetés dans les rivières ou même introduits dans la nappe.

b. Régularisation thermique : elle est fortement utilisée dans le refroidissement industriel qui exige des débits très supérieurs. Les eaux de surface dont la température varie avec les saisons conviennent mal à cet usage, tandis que le transit de ces eaux dans le sous-sol est susceptible d'entraîner une régularisation thermique permettant aux appareils de travailler dans de meilleures conditions.

3.1.2. Restauration de l'état initial d'une nappe dont la situation piézométrique porte préjudice à l'exploitation et aux cultures :

L'exploitation intensive d'une nappe peut rompre l'équilibre naturel et provoquer des perturbations diverses que l'alimentation artificielle est en mesure de combattre par exemple dans les cas suivants :

- l'abaissement de la surface piézométrique tend à accroître exagérément les charges d'exploitation : la recharge de la nappe peut être envisagée pour compenser l'action de nouveaux captages ;
- les prélèvements se font pour une part aux dépens des réserves, il s'agit d'une surexploitation conduisant à l'épuisement des ressources : la recharge artificielle s'impose le plus souvent comme étant la seule possibilité de restauration de la nappe ;
- le rabattement provoque la pénétration d'eaux salées (littoral) ou polluées dans la nappe : l'alimentation artificielle est en mesure de constituer un dôme hydraulique maintenant les captages à l'abri des eaux contaminées.

Dans tous ces cas, le déficit des ressources locales que traduit le déséquilibre de la nappe nécessite l'adduction de ressources extérieures. On a théoriquement le choix entre :

- la distribution directe de cet apport aux usagers ce qui permet de stabiliser ou de diminuer les prélèvements pratiqués sur la nappe ;
- l'introduction de cette eau dans la formation aquifère de façon à la restaurer tout en continuant d'accroître l'exploitation.

Ce choix est évidemment soumis à tout un ensemble de paramètres techniques et économiques qui varient considérablement d'un cas à l'autre.

3.1.3. Accroissement de la ressource et optimisation du régime d'exploitation :

L'accroissement de la demande d'eau provoque une pénurie des ressources disponibles. Cette constatation est valable tant pour les cours d'eau que pour les nappes souterraines. Pour certains cours d'eau le débit d'étiage et le taux de pollution rendent l'utilisation de ces eaux plus difficile surtout pour l'AEP.

Il s'ensuit que si l'on ne veut pas perdre la totalité de l'écoulement, il est nécessaire d'en stocker une partie en hautes eaux dans des barrages ou des réservoirs souterrains, en vue de moduler ensuite la distribution suivant les besoins.

Cet objectif constitue une application à plus grande échelle de l'alimentation. Il s'agit là d'une politique globale de gestion des eaux souterraines. Les réserves en eau sont souvent mal réparties et les besoins ne sont pas homogènes.

De grandes variations apparaissent dans le temps (été, hiver, sécheresse, etc.) et dans l'espace (zones urbaines, rurales, etc.) la méthode des prélèvements ponctuels et anarchiques doit céder le pas à une politique de gestion globale des ressources au niveau régional. La pénurie saisonnière des ressources disponibles est prévisible et il est nécessaire de stocker l'eau en surplus pour une utilisation différée.

Le stockage souterrain permet de moduler la distribution selon les besoins tout en permettant une protection efficace contre les pollutions accidentelles. Ce stock peut alors être exploité de façon régulière dans le cadre d'une régularisation de la ressource ou ponctuellement pour faire face à des situations exceptionnelles (sécheresse important, pollution des autres stocks, etc.) [9,24,26,27,28,29]

3.1.4. La création d'un dôme hydraulique susceptible d'arrêter la progression d'eaux salées ou polluées vers une zone d'exploitation :

Nous invitons le lecteur à consulter la bibliographie pour plus d'informations détaillées sur ce sujet.

4. Conditions générales d'utilisation de l'alimentation artificielle :

Les aménagements d'alimentation artificielle sont extrêmement variés selon les besoins, les caractères géographiques, géologiques, la nature et l'implantation des ouvrages d'alimentation [9,24,26,27,28,29]:

4.1. Conditions hydrologiques (source d'alimentation) : L'étude d'un projet d'alimentation artificielle devra déterminer dès le stade préliminaire les conditions hydrogéologiques et les caractéristiques de la source d'alimentation :

- **Débit :** le régime des eaux disponibles peut être assez régulier ou présenter des fluctuations saisonnières ou être intermittent (torrents, oueds...). Le décalage entre le régime de la source d'alimentation et celui de la demande est un facteur important qui doit être mis en relation avec la capacité de régularisation du réservoir naturel et les conditions de transfert de l'eau entre les points d'alimentation et les points de reprise ;
- **Qualité chimique et bactériologique :** la qualité des eaux doit être étudiée. Il faut qu'elle soit exempte de toute pollution susceptible d'altérer la qualité du gisement, en particulier des substances toxiques sur lesquelles la filtration naturelle est sans effet. De plus les eaux introduites doivent être chimiquement compatibles avec les eaux de la nappe ;
- **Turbidité :** il faut que l'eau introduite ne contienne que très peu de matières en suspension lorsqu'on se propose de l'utiliser sans traitement préalable (nappe alluviale). Cela est préconisé pour éviter un risque de colmatage des ouvrages d'injection ;

- **Température** : il faut éviter d'introduire des eaux à température trop élevée lorsque la régularisation thermique est insuffisante au sein de la nappe. Par ailleurs les fluctuations de la température qui peuvent modifier la perméabilité du milieu récepteur, permettent de prévoir les variations du débit d'injection.

4.2. Conditions hydrogéologiques et hydrodynamiques (réservoirs souterrains) : l'existence d'un aquifère ou réservoir souterrain est le premier élément dont on doit disposer. Pour stocker l'eau de recharge cela implique certains paramètres hydrogéologiques et hydrodynamiques :

- **Dimensions de la nappe** : la surface de la nappe ne doit pas être trop proche du sol pour autoriser un remplissage significatif et assurer une autoépuration appropriée ;
- **Transmissivité** : elle doit être favorable (épaisseur suffisante et perméabilité élevée), les formations de faible épaisseur ne permettent d'aménager que des stations à fonctionnement continu (recharge et reprise), alors que les formations épaisses et les nappes captives conviennent pour la régulation et le stockage. Concernant la perméabilité, il faut distinguer les terrains granulaires et les terrains fissurés car les premiers ont une frange non saturée relativement réduite ce qui limite le stockage. Les formations fissurées sont caractérisées par des circulations d'eau très rapides qui limitent le stockage et les processus d'épuration ;
- **Diffusivité** : c'est un paramètre qui régit la propagation d'influence dans un aquifère saturé. C'est le rapport de la transmissivité par le coefficient d'emménagement. Elle doit permettre un stockage important et un écoulement lent (perméabilité verticale importante et perméabilité horizontale modérée). Dans une opération d'alimentation artificielle il faut différencier deux paramètres distincts [9,24]: le transfert de la masse d'eau injectée qui est fonction de la transmissivité et du gradient hydraulique ; et le transfert des pressions à partir du point d'injection qui est fonction de la diffusivité des terrains aquifères ; si la diffusivité est importante l'effet de la recharge sur le débit des écoulements aux exutoires peut être trop rapide. Ceci explique que le maintien de l'élévation du niveau de la nappe (ou de la pression) est plus important que la conservation de la masse d'eau elle-même, cette masse pouvant séjourner longtemps dans le terrain alors que la charge supplémentaire résultant de l'opération peut transmettre rapidement jusqu'aux limites de l'aquifère une onde qui entraîne un accroissement du débit des écoulements aux émergences. Le bénéfice de l'alimentation artificielle est alors quasiment nul sur le plan quantitatif et en terme de mélange ;
- **Nature du sol** : c'est un élément fondamental car c'est dans la substance et dans la zone non saturée que vont se produire les principales réactions responsables d'une épuration de l'eau de recharge. A ce titre un sol idéal devrait avoir les caractéristiques suivantes : absence d'argile de surface susceptible de réduire la transmission de l'eau vers l'aquifère ; absence d'argile de surface susceptible de se dilater et de se contracter en créant des craquelures susceptible de créer des zones d'écoulement préférentiels notamment à la remise en eau après séchage du bassin de recharge ; présence d'argiles en quantités à la fois faibles mais suffisantes pour avoir une grande capacité d'adsorption des éléments traces et des métaux lourds et pour proposer des surfaces suffisantes aux micro-organismes de manière à ce qu'ils puissent jouer leur rôle en matière de dégradation des matières organiques ; un apport suffisant en carbone de manière à favoriser une dénitrification rapide et à favoriser le développement d'une population de micro-organismes qui pourront entrer en compétition avec les agents pathogènes susceptibles de se trouver dans l'eau brute de réalimentation.

5. Les différents types de recharge

5.1. Recharge par injection directe : ce type de recharge se fait par un ouvrage identique à celui d'un ouvrage de pompage. Des études réalisées en Israël [S.H.ABERBACH et al. 1967] montrent

que ces derniers peuvent servir à la recharge artificielle de la nappe sans aucune modification [24]. En France les premières expériences ont été menées en 1974 sur le site de Croissy-sur-seine en région parisienne. La recharge était effectuée par forage d'un diamètre de 1,50m, le débit d'infiltration fut atteint avec 3500m³/jour en moyenne. Cette technique a posé des problèmes d'exploitation et de colmatage et a été abandonnée au profit de bassins d'infiltration.

Aux états-unis et en Israël, ce procédé a été largement étudiée et appliquée [24]. Les premiers puits construits en Californie dans les années 1952-1953 n'étaient pas équipés de filtres, et les problèmes de colmatage et de turbidité des eaux furent tels que leur exploitation devint difficile au bout de quelques années. Par la suite les puits ont été équipés avec des matériaux traités contre la corrosion et munis d'écrans de gravier filtrant [9,24] (Fig.2,3).

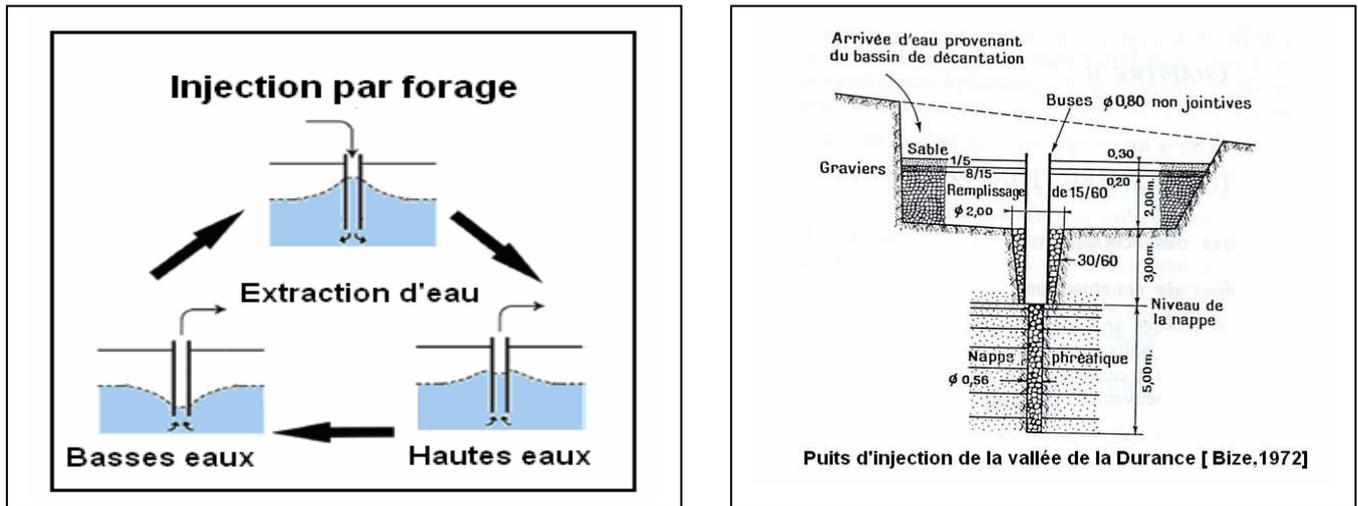


Figure 2 : Recharge artificielle par injection directe [Seghir K. 2008][9,24,26,27,28,29]

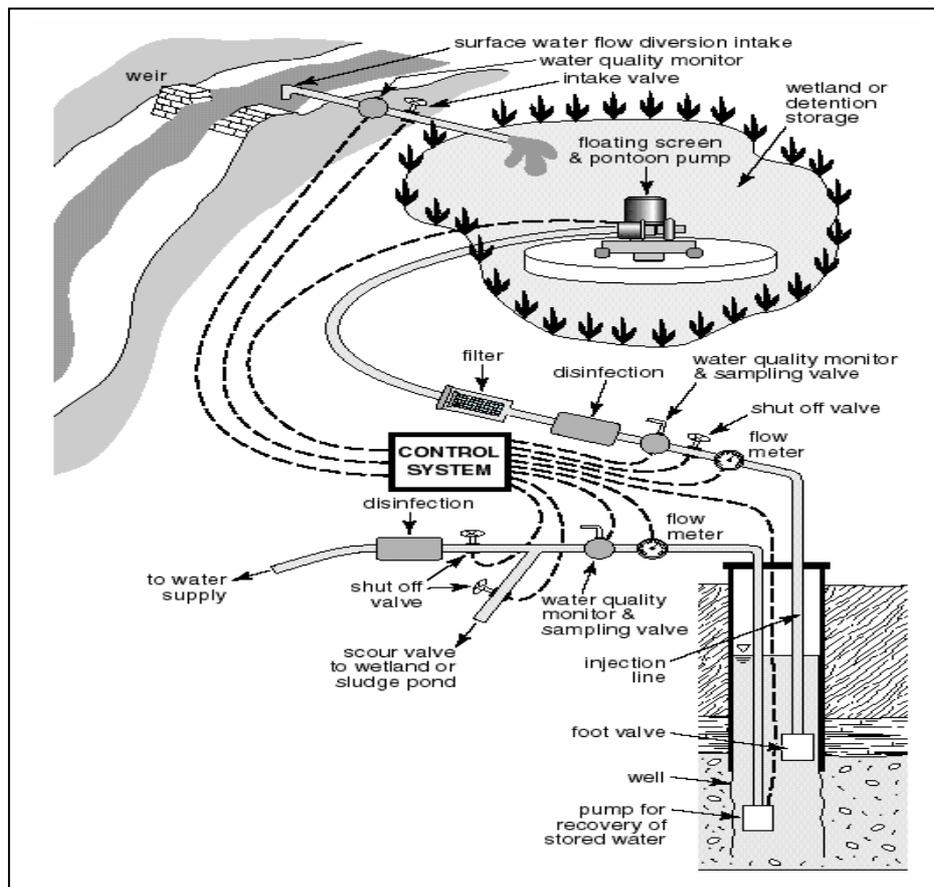


Figure3: Injection directe de l'eau traitée par forage [26,27,28,29]

a/ Avantages :

- Ce procédé ne nécessite qu'un minimum de place et peut être implanté à peu près partout ;
- Il permet la recharge des nappes captives profondes et des horizons aquifères difficilement accessibles par les eaux d'infiltration;
- Il ne nécessite pas de périmètres de protections étendues ;
- Il peut donner de bons résultats dans les zones côtières pour lutter contre les invasions marines.

b/ Inconvénients :

- La capacité de recharge est fonction des propriétés physiques de l'aquifère ;
- Une préparation préalable à l'injection est souvent nécessaire ;
- Si la surface d'injection est faible, cela entraîne obligatoirement des pressions plus élevées qu'il faut contrôler ;
- Du point de vue économique, la réalisation, le fonctionnement et la maintenance d'un forage d'injection sont très coûteux ;
- L'action épuratoire du sol est quasiment inexistante, et il est essentiel d'utiliser des eaux chimiquement et bactériologiquement pures afin de ne pas polluer la nappe souterraine ;
- Le colmatage est l'obstacle majeur auquel se heurte le fonctionnement de tout ouvrage d'alimentation artificielle ;
- Le décolmatage des forages est rendu aléatoire par l'impossibilité pratique d'accéder aux parties actives des ouvrages.

5.2. Recharge par bassins d'infiltration : cette technique est utilisée aux États-Unis depuis longtemps et chaque application a sa propre installation. Les taux d'infiltration sont très variables de quelques centimètres à quelques dizaines de mètre par jour et les vitesses extrêmes observées sont comprises entre 0,03 et 61 m/j.

En Californie, 40% de l'eau potable distribuée à Los Angeles provient d'eau souterraines dont 55Mm³ proviennent de recharges artificielles par le biais de 36 bassins d'infiltration représentant 13Km² [24].

En Europe, la bibliographie fait état de taux de recharge très variables. Aux Pays-Bas, la recharge par bassin d'infiltration a débuté en 1940. En 1950, des projets plus ambitieux ont été mis en service pour alimenter la partie ouest du pays, sensible aux intrusions marines.

En 1984 la recharge par bassins était évaluée à 156Mm³, couvrant ainsi 15% de l'AEP [J.H.PETERS, 1988 in Detay, 1997[24]. En France, la première opération était à Croissy-sur-seine en 1959. L'eau de la seine était traitée à l'aval de Paris avant d'être introduite par l'intermédiaire de cascades d'aération, dans des sablières à fond sablo-greiveleux.

L'eau s'infiltrait à une vitesse moyenne de 1 m/j. Les résultats sont généralement variables et ils sont fonction de très nombreux paramètres dont les plus importants sont : la perméabilité du sol et de la couche superficielle, le taux d'humidité des terrains, la pente du bassin, la profondeur de la nappe et la température de l'eau, et la teneur en matières en suspension (Fig.4,5).

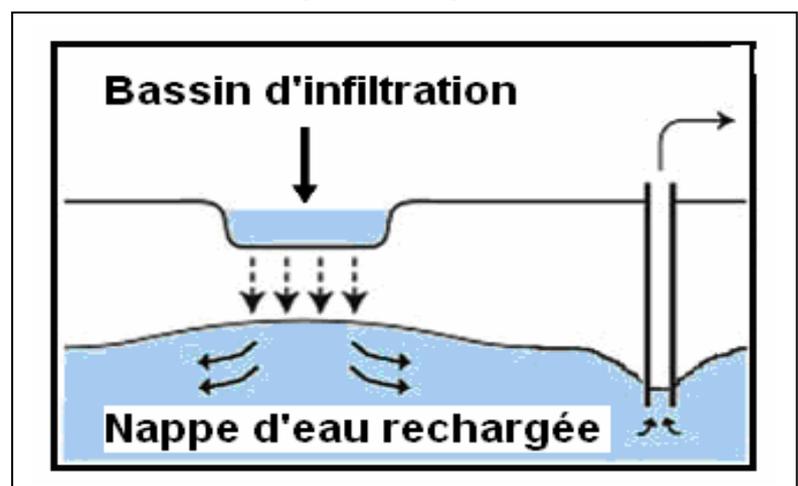


Figure 4 : Recharge artificielle par bassin d'infiltration [Seghir K. 2008]

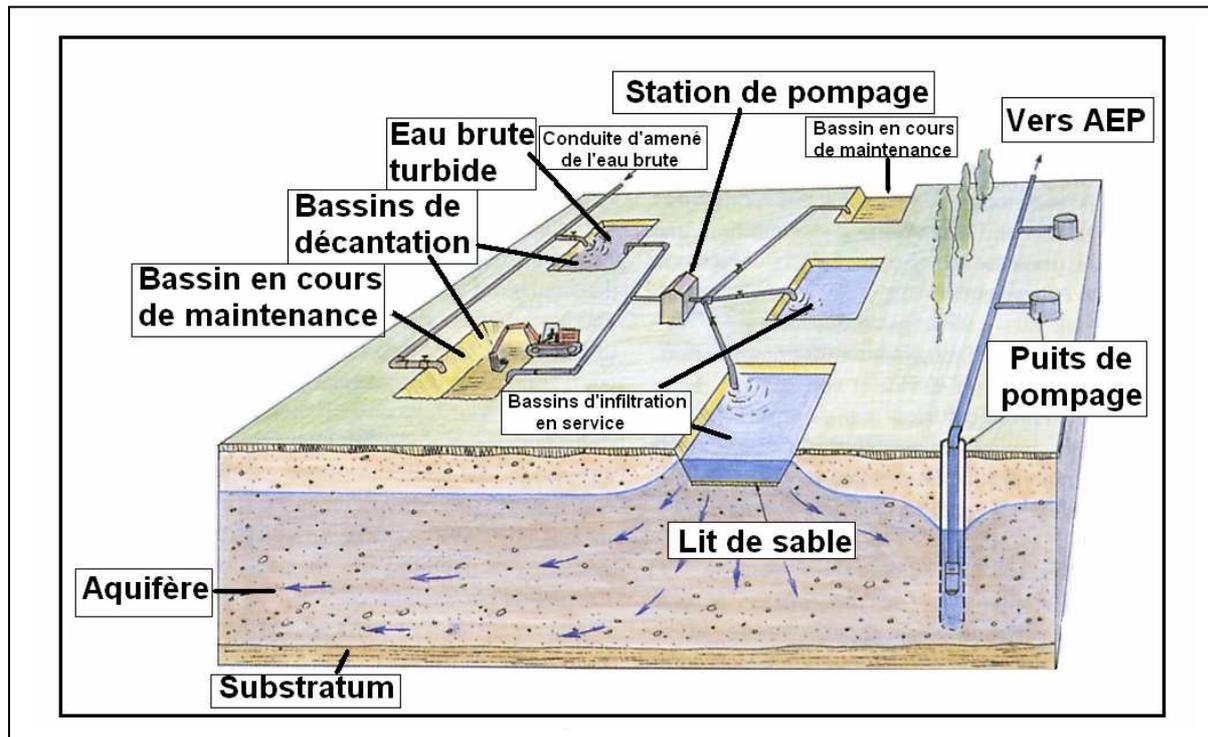


Figure 5 : Diagramme présentant le principe d'une station de recharge artificielle par bassins d'infiltration [26,27,28,29]

a/ Avantages :

- Cette méthode est simple pour obtenir des débits élevés avec un minimum d'aménagement physiques sur le terrain ;
- Les charges d'exploitation sont plus faibles que dans le cas d'une injection directe ;
- Le pouvoir auto-épuration du sol joue un rôle important grâce à l'utilisation du réacteur sol zone non saturée ;
- Ils permettent une certaine auto épuration de l'eau avant son infiltration ;
- Ils sont plus répandus pour l'alimentation des nappes libres, alluviales et peu profondes.

b/ Inconvénients :

- Cette technique n'est pas recommandée pour l'alimentation des nappes captives ou très profondes ;
- Coût élevé d'acquisition des surfaces étendues ;
- Les surfaces d'injection nécessaires sont très importantes ce qui signifie une mobilisation de terrains très étendue ;

5.2.1. Les différents types de bassins d'infiltration : on distingue plusieurs types de bassins. Le choix du bassin utilisé se fait en fonction des conditions du milieu (zone urbaine ou rurale), de la qualité des eaux de recharge et des objectifs de l'alimentation artificielle (eau potable ou pour l'agriculture) :

- **Bassins à fond nu :** ce sont des cavités simplement creusés dans le sol sans aucun aménagement particulier. Ils ont une faible profondeur pour ne pas accentuer les problèmes du colmatage par augmentation de charge hydraulique. Malgré tout ils restent très sensibles à ce problème et il est nécessaire de travailler le fond du bassin régulièrement par labourage ou grattage. Les débits d'infiltration sont de l'ordre de 0,30 à 1m par jour ;

- **Bassins à végétations** : ils donnent de bons résultats, notamment en Allemagne, mais H.LOFFLER (1967) considère que ce procédé ne peut être utilisé que lorsque la perméabilité verticale du terrain est supérieure à $2 \cdot 10^{-6}$ m/s. De nombreuses études ont montré le caractère positif de la végétation dans le bassin d'infiltration [24] notamment le bermuda-grass géant, le riz ou le souclan-grass. Les plantes jouent un triple rôle de protection, d'aération, et d'épuration :
 - protection contre l'érosion ;
 - augmentation de la perméabilité et décolmatage du sol grâce au développement des racines en profondeur ;
 - rétention par assimilation de certains éléments minéraux ;
 - Ils favorisent la dénitrification.

La maintenance de ces bassins doit être soignée car un apport d'eaux de qualité médiocre, une épaisseur trop importante de la tranche d'eau ou une immersion trop longue peuvent entraîner un dépérissement de la végétation donc un risque de colmatage du fond et de pollution organique de l'eau. Le taux d'infiltration est évalué entre 0,2 à 0,6 m/j.

Des études réalisées aux États-unis par H.BOUWER, 1970, ont montré que ce type de bassins est celui où l'on obtient les meilleures vitesses d'infiltration. Les vitesses les plus faibles étant enregistrées dans les bassins à sables et graviers [24].

- **Bassins à sable** : ils sont soigneusement aménagés et recouverts d'une couche de sable calibré qui fait office de filtre. Ils demandent un investissement plus important et sont préférentiellement utilisés dans des dispositifs destinés à fournir de l'eau potable. Le fond du bassin peut être recouvert d'une couche de sable plus ou moins épaisse (50 cm). Cette couche permet une filtration lente de l'eau et assure une optimisation des différents phénomènes d'épuration (physiques ou biologiques). Le taux d'infiltration est plus fort (2 à 5 m/j) ;

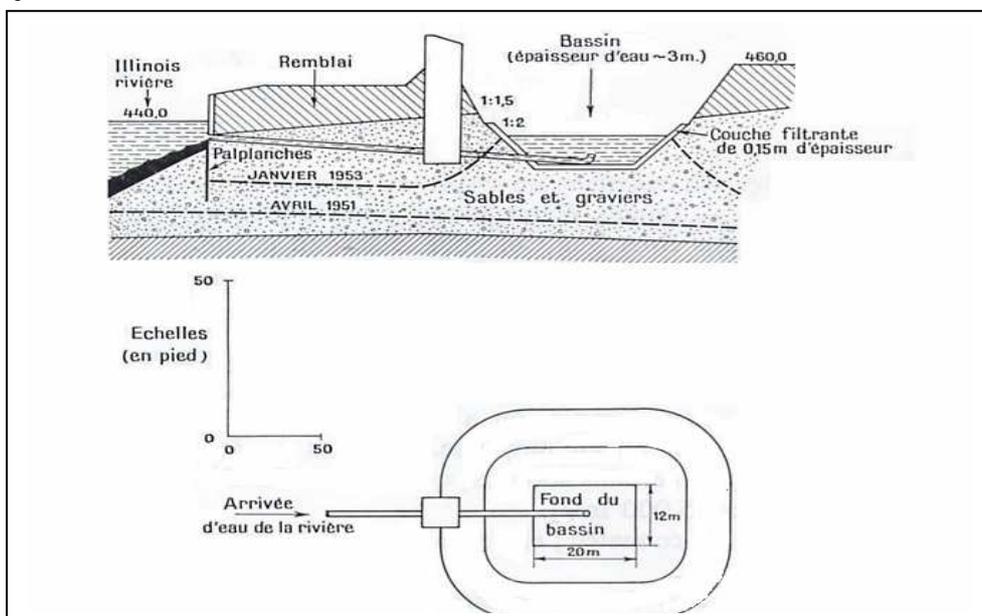


Figure 6 : Plan et coupe d'un bassin d'infiltration [9]

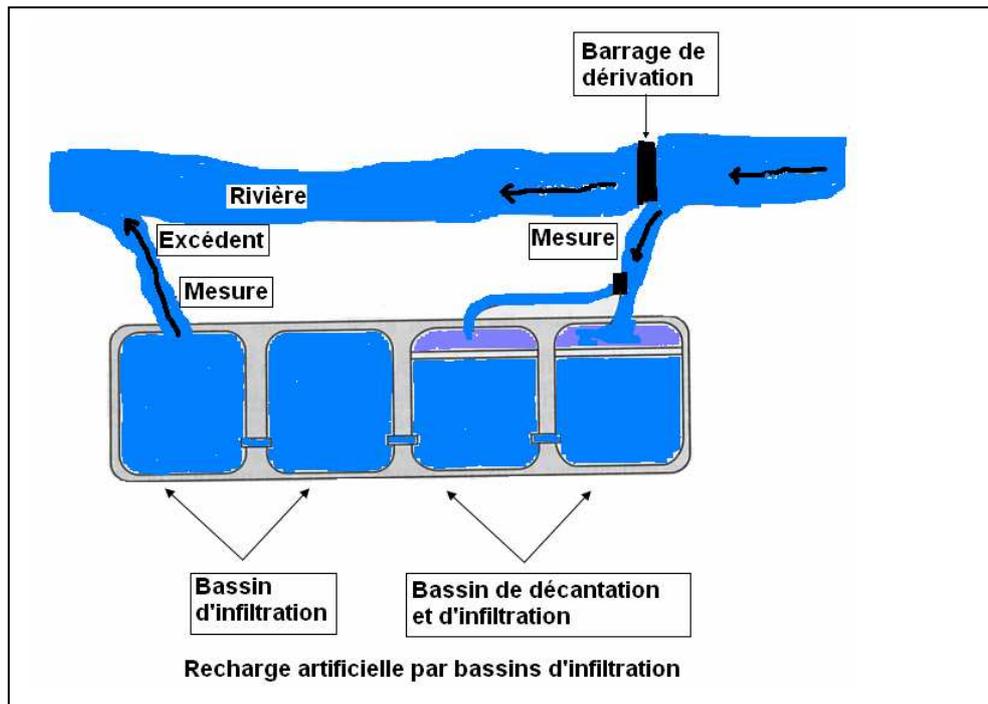


Figure 7: Recharge artificielle par plusieurs bassins de décantation et d'infiltration [9,24]

5.3. Recharge induite : elle consiste à accroître le taux d'infiltration à travers le fond et les berges des cours d'eau. Un pompage se traduit par un abaissement du niveau piézométrique autour du forage et si celui-ci est effectué à proximité immédiate d'un cours d'eau il s'établit un gradient hydraulique entre ce dernier et l'ouvrage d'exhaure.

Toutefois cette opération n'aboutit pas à une augmentation du volume d'eau stocké et se caractérise par un prélèvement des eaux de surface après transit souterrain.

C'est la raison pour laquelle on ne peut pas parler d'alimentation artificielle. De nombreux facteurs contrôlent l'importance de cette opération :

- la conductivité hydraulique et la température de l'aquifère ;
- la superficie et la perméabilité du lit et des berges du cours d'eau ;
- le gradient hydraulique créé par le pompage.

Il ne faut pas négliger les caractéristiques chimiques des eaux de surface car une forte charge polluante risque d'une part de dégrader la qualité des eaux souterraines et d'autre part de se retrouver dans l'ouvrage d'exploitation.

5.4. Les autres dispositifs de recharge : ces dispositifs ont été décrits depuis de nombreuses années [9,24]. La plupart des auteurs s'accordent sur le fait que les facteurs qui contrôlent le taux de recharge sont les suivants (Fig.8) :

- le temps de résidence des eaux dans le système d'infiltration ;
- la perméabilité du sol ;
- la superficie de l'aire inondée.

5.4.1. Inondation et irrigation : le principe consiste à inonder ou à arroser de façon intensive une vaste superficie de terrains. Pour cela, il faut que la pente soit faible (2 ou 3%) pour éviter un trop fort ruissellement et que le volume d'eau soit de l'ordre de quelques centimètres ou plus.

Ce système est sujet au taux d'évaporation et nécessite d'utiliser de grandes surfaces de terrains. L'avantage réside dans le fait qu'en dehors des périodes de cultures, il est possible d'utiliser les ouvrages d'irrigation agricoles (canaux, arrosage, etc.) afin de développer l'alimentation artificielle des nappes souterraines. Cette méthode peut être utilisée là où les conditions géologiques ne permettent pas de réaliser des bassins ou des forages de réalimentation.

5.4.2. Canaux de dérivations : le but de cette technique est d'accroître l'infiltration naturelle des eaux de rivière. Il est possible de réaliser plusieurs dérivations afin de diriger les eaux dans des secondaires artificiels et spécialement aménagés (font plat, couche filtrante) les avantages de ce système sont les coûts de construction réduits et un entretien minimal.

Toutefois, la charge hydraulique est faible et les eaux d'infiltration sont chargées en sédiments (surtout lors des crues). Dans ces conditions, le taux d'infiltration est réduit et les problèmes de colmatage importants.

5.4.3. Aménagements de cours d'eau : cette technique consiste à amplifier l'alimentation naturelle des terrains alluvionnaires. Pour ce faire, on peut augmenter la surface du lit et accroître la charge hydraulique. Pour cela, il y a plusieurs méthodes :

- la création de sillons obliques permet de diriger les eaux vers l'extérieur, comme dans un système d'irrigation ;
- la mise en place de digues au travers du fleuve arrête la circulation de l'eau, et de plus réduit la vitesse d'écoulement ;
- la construction de barrages a une triple action : elle permet d'augmenter la surface de mise en eau, d'accroître la charge hydraulique et de ralentir la circulation de l'eau. Tout cela contribue à l'augmentation de taux d'infiltration.
- Cette technique est rentable du fait des faibles coûts de construction et de maintenance.

5.4.4. Puits filtrants et fosses : ils sont peu utilisés et représentent un intermédiaire entre l'injection et la filtration. Ces puits peuvent être mis en œuvres lorsque les terrains aquifères sont séparés de la surface du sol par une couche relativement mince de sédiments très peu perméables ou imperméables.

Malheureusement, leurs faibles surfaces d'infiltration autorisent une recharge limitée et leur maintenance, plus délicate, est relativement coûteuse. Les fosses sont comparables aux bassins d'infiltration mais leurs dimensions sont plus faibles et permettant l'infiltration latérale à travers les parois. Elles sont utilisées pour l'infiltration d'eaux brutes car les matières en suspension se déposent sur le fond, permettant ainsi aux berges de jouer le rôle de plage d'infiltration.

H.HANTKE (1983) a tenté de déterminer le taux de recharge prévisible pour une fosse à partir de ses dimension :

$$Q=0,139(h_2-h_1)/K$$

Avec : Q : le taux de recharge en m³/m²/j ;

h : la profondeur de la fosse en m ;

l : la largeur de la fosse en m ;

K : la perméabilité des terrains en m/s.

5.4.5. Méthodes mixtes : cette méthode consiste à installer des collecteurs horizontaux sous les bassins d'infiltration lorsque ceux-ci sont situés au dessus d'une couche peu perméable. L'infiltration se développe dans les premiers mètres du sol puis les collecteurs dirigent l'eau vers des puits qui traversent la zone moins perméable et atteignent la nappe.

Les bassins d'infiltration équipés de fosses ou puits permettent d'obtenir de bons résultats lorsque les terrains superficiels sont imperméables [24]

5.4.6. Récupération des eaux météoriques : cette méthode est utilisée fortement dans les zones urbanisées à terrains imperméables à cause des recouvrements de surface (bitume, ciment, pavage, etc.) qui tendent à réduire considérablement le volume d'eau météorique qui parvient à la nappe souterraine.

Plutôt que de laisser les eaux de ruissellement s'écouler jusqu'au égouts, il est possible de les collecter et de leur permettre de s'infiltrer dans le sol [J.TOURBLER, 1978]. Plusieurs solutions ont été envisagées :

- les chaussées filtrantes ;
- les chaussées réservoirs ;
- les pavages perméables ;
- les drains collecteurs équipés d'un dispositif de filtration.

S'ils étaient généralisés, ces systèmes contribueraient à une meilleure politique de gestion globale des eaux souterraines.

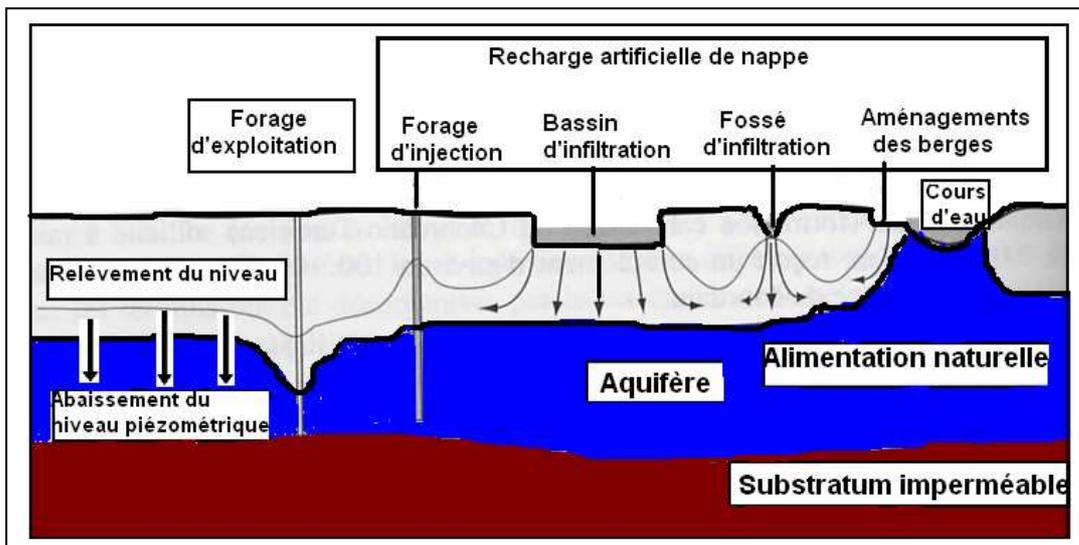


Figure 8 : Différentes méthodes de recharge artificielle des nappes alluviales [Detay, M., 1997, modifié par Seghir K.]

II. Étude de faisabilité de la recharge artificielle dans la région d'étude

L'étude de la faisabilité d'une telle technique nécessite la prise en considération de plusieurs facteurs importants pour la réussite de l'opération. Ces facteurs dépendent principalement de l'existence de la source de réalimentation en quantité et en qualité.

Cependant, il existe un organigramme qui nous permet de prendre une décision concernant l'application de la recharge artificielle dans n'importe quelle région.

Ce diagramme se base essentiellement sur la connaissance de la disponibilité du réservoir de stockage, de l'existence de la source d'alimentation en quantité et en qualité et de sa compatibilité avec l'eau de la nappe (Fig.9).

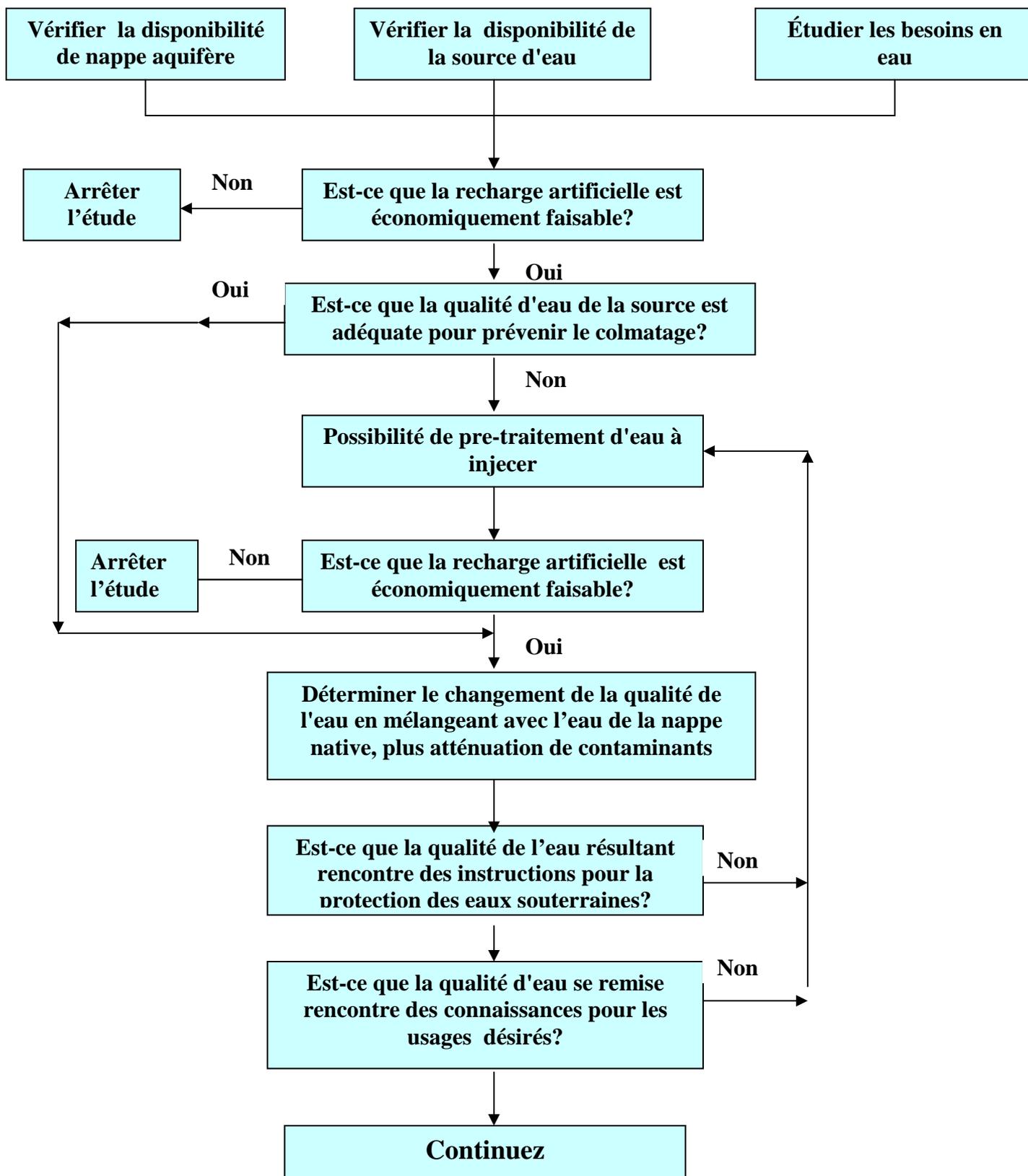


Figure 9 : Organigramme d'aide à la décision pour la recharge artificielle des nappes (de Dillon and Pavelic, 1996) [26,27,28,29](traduit et modifié par Seghir K.)

Pour notre cas on peut vérifier la faisabilité de la méthode selon les données et les études (géologique, hydrogéologique, hydro chimique, bactériologique) qu'on a fait sur la région d'étude :

1. Caractérisation hydrogéologique (la nappe à recharger) : La nappe aquifère de Tébéssa – Morsott -Hammamet couvre pratiquement l'ensemble du sous bassin versant d'oued Chabro et

Bouakous. Elle est constituée essentiellement de remplissage du quaternaire. Les alluvions sont constituées de cailloutis de calcaires enveloppés dans une matrice plus ou moins argileuse. Elle est exploitée par 22 forages avec un débit d'exploitation total égal 390 l/s, et 252 puits à $Q_{exp}=230$ l/s. Le volume d'eau mobilisé est 650 l/s, un débit qui dépasse largement les possibilités aquifères de la nappe.

Cette surexploitation a entraîné un rabattement important du niveau statique de la nappe [76,77,78,79,80,81] :

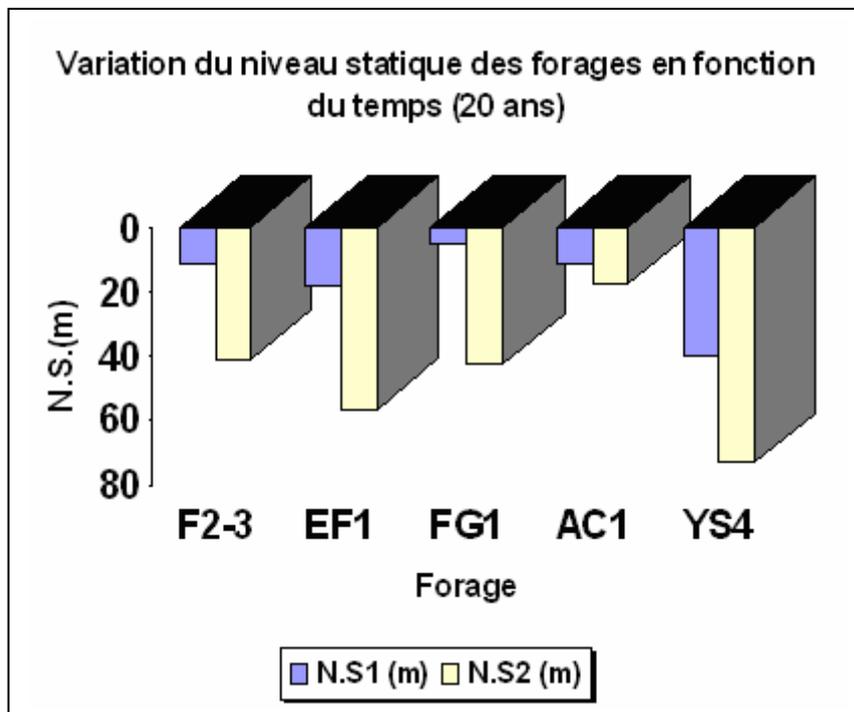


Figure 10: Abaissement du niveau statique dans les forages de la région d'étude [76,77,78,79,80,81]

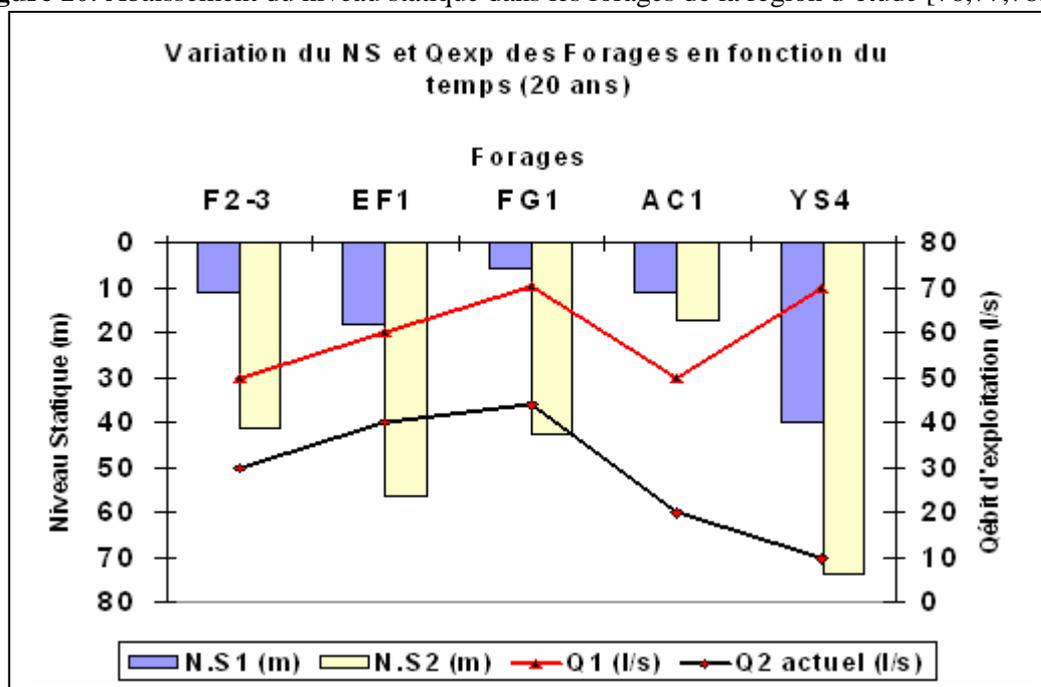


Figure 11: Diminution du débit d'exploitation en fonction du niveau statique [76,77,78,79,80,81]

Les figures ci-dessus (Figure 10,11) présentent l'abaissement du niveau statique et le débit d'exploitation dans quelques forages. Cet abaissement est considérable pour une période qui s'étale

entre le début et quelques années après son fonctionnement. Cette simple approche nous montre clairement :

- Un rabattement fort du niveau statique de 30 m à peu près ;
- Une diminution de débits d'exploitation, très distinctifs, de 70 l/s à 10 l/s.

D'autre part, sur le plan hydrodynamique, les mesures piézométriques effectuées pendant les années 2005,2006 montrent que la profondeur de la surface piézométriques par rapport au sol est très variable dans l'espace et dans le temps. Elle varie entre 1,5 et 25m en période des hautes eaux et entre 9 à 45 m en période des basses eaux.

La perméabilité du sol est de l'ordre de $7,9 \cdot 10^{-3}$ et $6,9 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ et la transmissivité de l'ordre de $0,052/56 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ Cet aquifère joue un rôle très important dans l'alimentation en eau potable des agglomérations. La zone de forte perméabilité se situe dans la zone de Ain chabro-Oued/ Bouakous où elle peut aller jusqu'à 4 à $6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$. Par contre, dans la zone de Hammamet, les valeurs sont moyennes et varient entre 1 et $3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$.

Les faibles valeurs sont observées dans la partie Est de la plaine de Tébessa. Dans la zone de Ain chabro - Oued Bouakous, les valeurs sont fortes de l'ordre de $24 \times 10^{-3} \text{ m}^2 / \text{s}$, ce qui est confirmé par l'étude géophysique indiquant la présence de graviers et cailloutis de calcaires. Par contre, dans la zone de Hammamet –Meddoud et la partie Est de la plaine, on note des valeurs moyennes qui varient entre 4 à $12 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, ce qui est expliqué par la présence des argiles et des éléments plus fins qui dominent les formations existantes au centre de la plaine (cf. chapitre hydrogéologique) [76,77,78,79,80,81]

2. Caractérisation hydro chimique des eaux (compatibilité de la qualité) : les eaux de la nappe montrent deux faciès chimiques dominants : chloruré sodique, et sulfaté calcique (eaux salées). Cela a été bien confirmé dans la partie centrale et le Nord de la plaine où l'influence des terrains triasiques salifères riches en halites est fortement ressentie, vu la proximité des points d'eau des affleurements triasiques du Dj. Belkefif. En s'éloignant vers l'amont (le long de la route Nationale N°10 vers la partie Ouest de la plaine), l'influence du Trias s'amortit et le faciès devient plutôt bicarbonaté calcique traduisant ainsi l'influence de la matrice carbonatée des bordures Sud-Ouest de la nappe qui constituent une limite à flux entrant (recharge naturelle par les eaux météoriques).

La qualité chimique des eaux est bicarbonaté calcique au niveau du forage F₁ et des eaux circulant dans l'oued (Oued amont, et aval) issues de la source minérale bouakous. L'origine de cette chimie est due à la lithologie des terrains traversés qui sont constitués de marnes gypsifères, de cailloutis de calcaires, calcaires et dolomies aux bordures sud-ouest.

De plus, il faut noter la concordance de qualité physico-chimique entre l'eau de la nappe et celle de l'oued de Bouakous, ce qui nous encourage à recommander l'application de la recharge artificielle de la nappe (Figure 12,13,14) (cf. étude de la qualité chimique des eaux) [76,77,78,79,80,81]

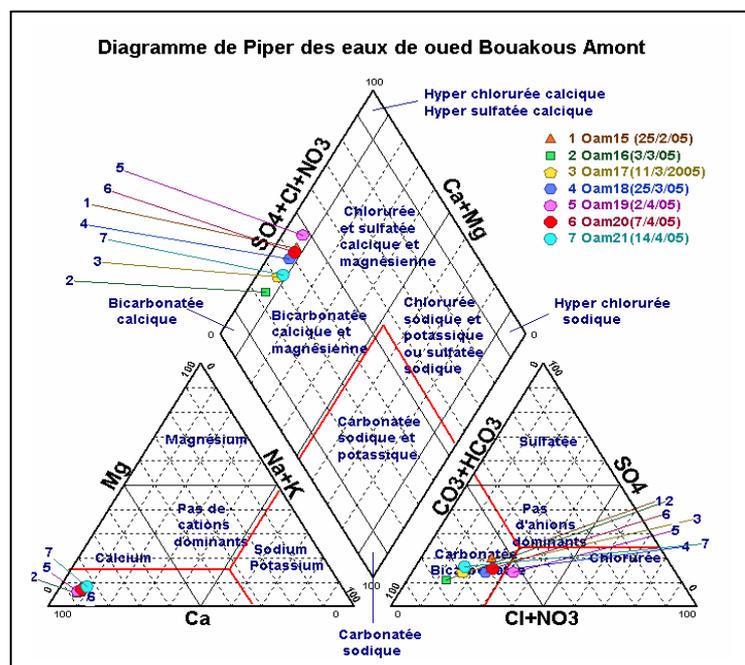
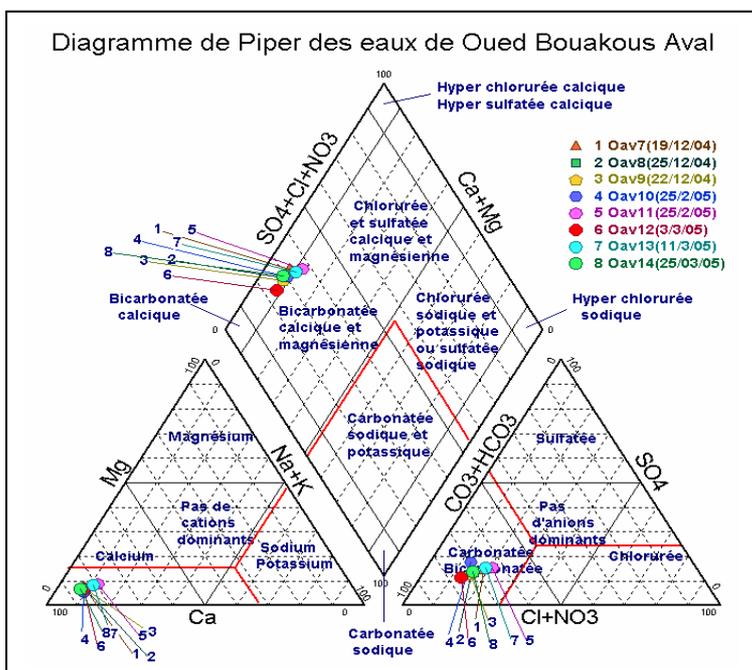
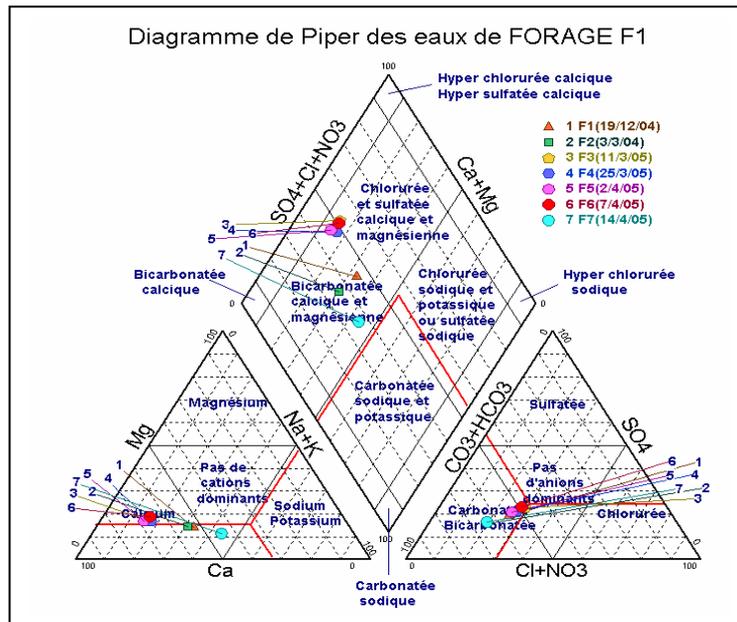


Figure 12,13,14: Présentation par diagramme de Piper de la qualité chimique des eaux de l'oued bouakous et du plus proche forage (F₁) [76,77,78,79,80,81]

3. Qualité bactériologique des eaux : comme il a été constaté au chapitre précédent, qui concerne l'étude de la qualité bactériologique des eaux de surface ainsi que les eaux souterraines de la nappe alluviale Ain chabro-Tébessa. Nous avons trouvé que les eaux de surface et quelques puits sont polluées et sont de mauvaise qualité bactériologique, selon les normes algérienne appliquées pour les eaux potables (cf. étude de la qualité bactériologique)

4. Besoins en eau de la région : Actuellement, l'alimentation en eau potable de la ville de Tébessa est assurée par un approvisionnement en pompage continu divisant sur 4 champs (Ain Zeroug, Bekkaria, Tébessa ville, Merdja) dont la production totale annuelle atteint 7382323 m³/an.

En 1995, le volume total produit pour toute la wilaya est 18.422.284 m³/an dont 76% (près de 14.000.935 m³/an) a été réellement distribué, 85% de ce volume distribué étant destinée au secteur de l'AEP. Par conséquent, la dotation attribuée à chaque habitant est d'environ 60

l/habitant/jour. Cette dotation est en dessous des normes internationales fixées à 450 l/hab./j pour une agglomération de 500.000 habitants. Les ressources exploitées dans la ville de Tébessa se basent sur l'exploitation de 23 forages soit un débit total de 356 l/s (y compris un forage destiné à l'AEI), avec un volume produit moyen égal à 33247 m³/j, un volume réellement distribué égal à 29900 m³/j, et 24 réservoirs avec une capacité de 24400 m³ (Fig.15,17).

Dans la commune de Hammamet, les ressources en eau reposant sur l'exploitation de 5 forages pour un débit total de 67 l/s, soit 5761 m³/j, avec une dotation de 125 l/habitants/j (Fig.16). La production totale à travers le transfert Nord dans la région de Hammamet (d'après E. P. D .E .M .I. A) en 2004 a été estimée à 163980 m³/an, et en 2005 elle a été estimée à 160458 m³/an. [76,77,78,79,80,81]

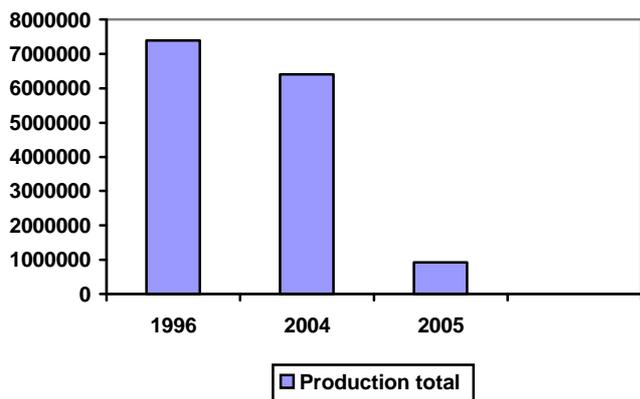


Figure 15 : Évolution de la production d'eau dans la région de Tébessa [1,19,76,77,78,79,80,81]

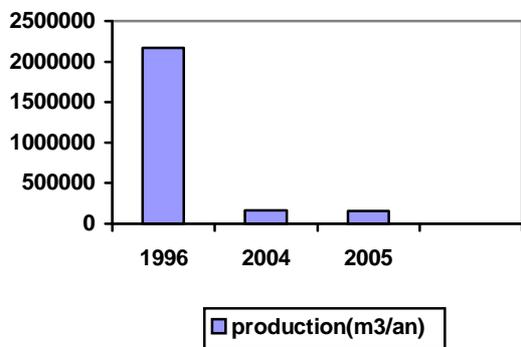


Figure 16 : Évolution de la production d'eau dans la région de Hammamet [1,19,76,77,78,79,80,81]

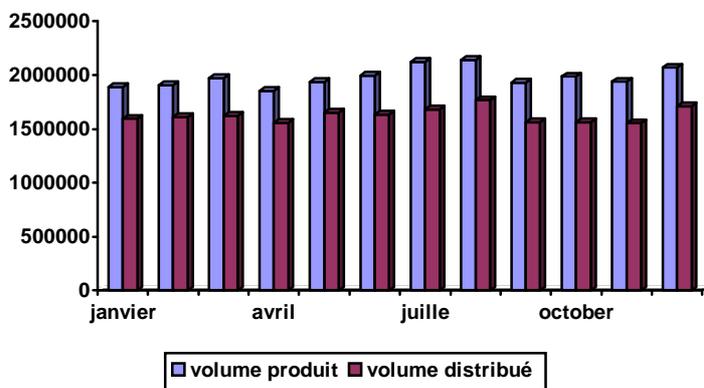


Figure 17 : Volume produit et Volume distribué de l'année 2004 à Tébessa [1,19,76,77,78,79,80,81]

Les données précédentes permettent d'évaluer les besoins en eau destinée à l'A.E.P pour chaque année en fonction des volumes d'eau disponibles. Le rapport volume disponible sur besoin en eau donne de nouveaux taux de satisfaction pour chaque horizon prévu. Le résultat est un déficit total, les besoins dépassant de loin le volume disponible.

D'autres part, l'augmentation de la population future de la région d'étude est évidente et par conséquent nous prévoyons une augmentation proportionnelle des besoins en eau potable, dans le même sens. L'analyse des figures ci-dessus montre bien que :

- l'augmentation du volume d'eau produit ou distribué d'une année à l'autre est fonction de l'accroissement de la population ;
- le volume perdu est considérable, et ce à cause de l'état vétuste des réseaux de distribution et des branchements illicites ;
- Le taux de satisfaction décroît au fur et à mesure que le volume d'eau perdu croit.

D'après la direction de statistique et planification (DSP) de la W. de Tébessa, et des travaux antérieurs, le taux d'accroissement de la population de la wilaya est estimé à 2.7 %.

L'analyse de bilan ressource – besoins de la région de Tébessa pour une période allant de 1995 à 2030 (Tab.2), calculé par l'E.P.D.E.M.I.A. en 1996, a montré que seules les cinq premières années (de 1995 à 2000) qui représentent une satisfaction générale en eau, mais à partir de l'année 2005 jusqu'à l'année 2030, le bilan sera déficitaire :

Tableau 1 : Bilan d'eau Ressources-Besoins dans la région de Tébessa [76,77,78,79,80,81]

Année	population	Ressources mobilisées * 10 ⁶ (m ³ /an)	Besoins AEP (* 10 ⁶ m ³ /an) pour une dotation de 80 l/hab./j	Besoins en AEA (*10 ⁶ m ³ /an) pour une dotation de 3600 m ³ /ha/an	Besoins en AEI (* 10 ⁶ m ³ /an) pour une dotation de 683 m ³ /emploi industrie/an	Besoins totaux (*10 ⁶ m ³ /an)	observation
1995	542710	37.0742	15.84	10.80	5.65	32.29	satisfaction
2000	620041		18.10	11.93	6.62	36.63	satisfaction
2005	708390		20.68	13.87	12.93	41.17	déficit
2010	809328		23.63	15.77	12.93	52.33	déficit
2015	924649		26.84	16.74	12.93	56.66	déficit
2020	1056402		30.84	18.74	12.93	61.77	déficit
2025	1206928		35.24	18.90	12.93	67.07	déficit
2030	1378903		40.26	19.57	12.93	72.76	déficit

5. Source d'alimentation (bassin versant de bouakous) : le bassin versant de Bouakous fait partie du bassin versant de Hammamet. il reçoit une pluie moyenne annuelle égale à 310 mm et un apport liquide annuel très important. Malheureusement, cet apport n'est jamais capté d'une façon régulière, sauf par quelques ouvrages de captages au niveau des sources émergées. Il est caractérisé par un climat semi aride qui s'exprime habituellement par :

- des pluies torrentielles, qui tombent souvent sous forme des crues dont le nombre noté est quatre (4) crues par année, avec une intensité qui varie entre 40 et 80 mm (par exemple en 1979 ils ont enregistré une précipitation maximale journalière égale à 61 mm, donc un volume d'apport liquide atteint de 1.765.950 m³. Malheureusement ce volume n'a pas été capté !) ;
- les pluies tombent souvent sous forme diluvieuse, entraînant avec elles des apports solides très remarquables sur le lit d'oued Bouakous (5.272 t/an avec un taux d'abrasion égal 606 t/km²/an).

Le sous bassin versant de Bouakous a une superficie d'environ 16 km², il est drainé par l'oued Bouakous a circulation irrégulière et est alimenté en amont par la source de Bouakous (source minérale émergée depuis longtemps est de très bonne qualité avec un débit atteint pendant les crues de 81 à 220 l/s en période humide).

La couche superficielle du sol au niveau de la région d'étude est généralement constituée par des cailloutis de calcaires et galets peu argileux de perméabilité très bonne favorisant davantage l'infiltration. Le réseau hydraulique du sous bassin de l'oued Bouakous est constitué par des petits cours d'eau qui ramassent l'ensemble des eaux superficielles et les déversent sur l'oued principal Bouakous (Fig.18) [76,77,78,79,80,81]

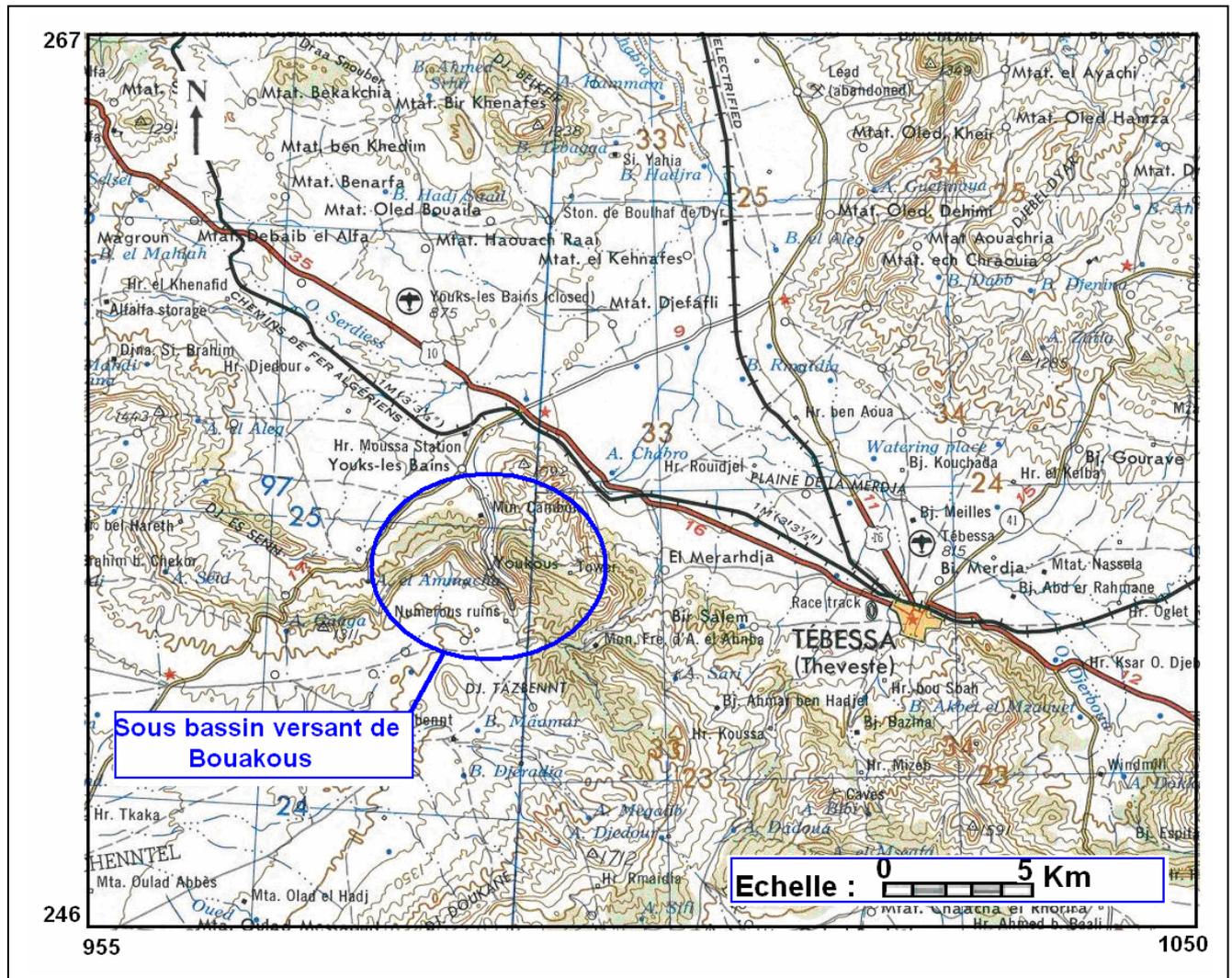


Figure18: Le sous bassin versant de Bouakous

Le bassin versant de Bouakous présente toutes les caractéristiques naturelles favorables à une érosion accentuée : un faible couvert végétal, des reliefs dont la nature lithologique est favorable à la dégradation (formations affleurantes de type marneux), un climat de type méditerranéen caractérisé par des pluies plus au moins torrentielles, irrégulières, engendrant en des temps de concentrations courts des fortes crues, rapides et chargées dont les conséquences ont des répercussions directes à l'amont, par des pertes de sols et des ravinelements intenses, et à l'aval, par l'envasement.

Selon les habitants de la ville de Hammamet, les fortes crues sont fréquentes dans la zone d'étude. Lors des crues les eaux débordent par-dessus les berges de l'oued et un écoulement de débordement se forme. La détermination du débit maximum probable des crues est intéressante en

raison de la nécessité de calculer certains ouvrages hydrauliques de protection qui doivent faire face au phénomène d'inondation et compte-tenu de certaines considérations d'optimum économique. Les crues observées et enregistrées dans la région d'étude sont présentées dans les figures 19,20,21,22). Une étude hydrologique détaillée est recommandée pour estimer avec certitude des quantités des apports solides et leur effet sur l'ouvrage de réalimentation en aval [76,77,78,79,80,81] :

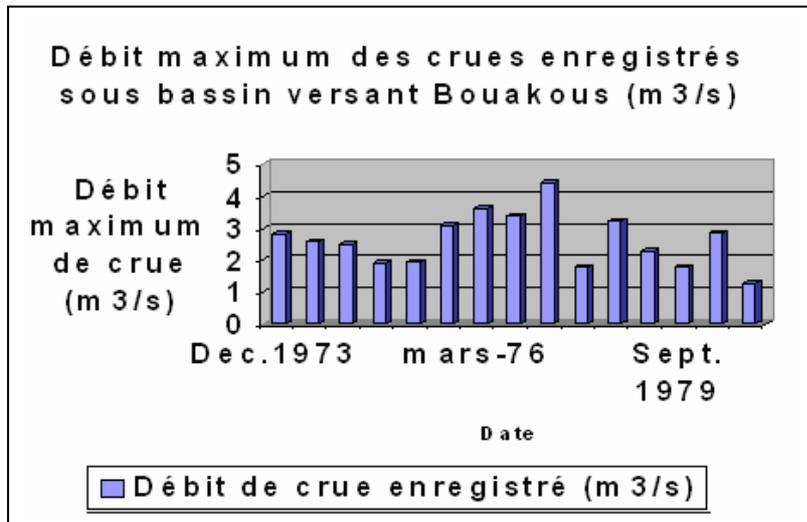


Figure 19 : Débits des crues enregistrés [ANRH,W.Tébessa] [76,77,78,79,80,81]

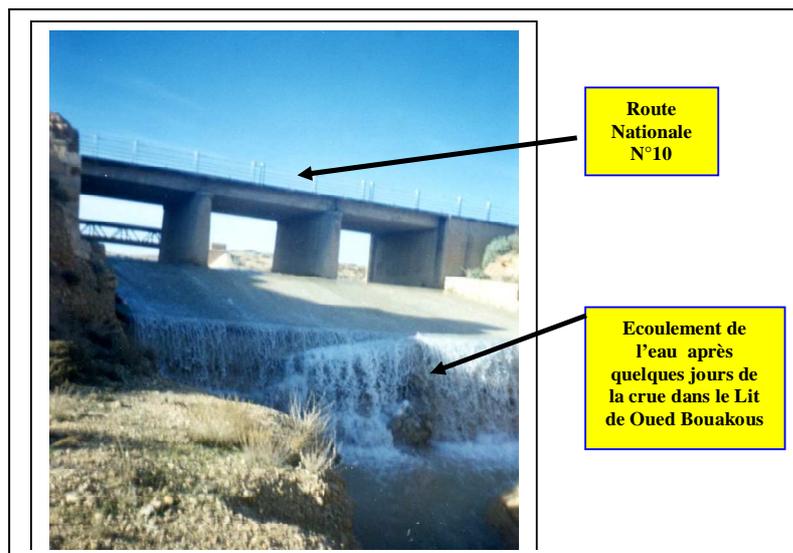


Figure 20 : Écoulement de l'eau dans le lit de l'Oued Bouakous après la crue[76,77,78,79,80,81]



Figure21: Niveau de l'eau dans le lit de l'Oued Bouakous pendant et après une crue[76,77,78,79,80,81]

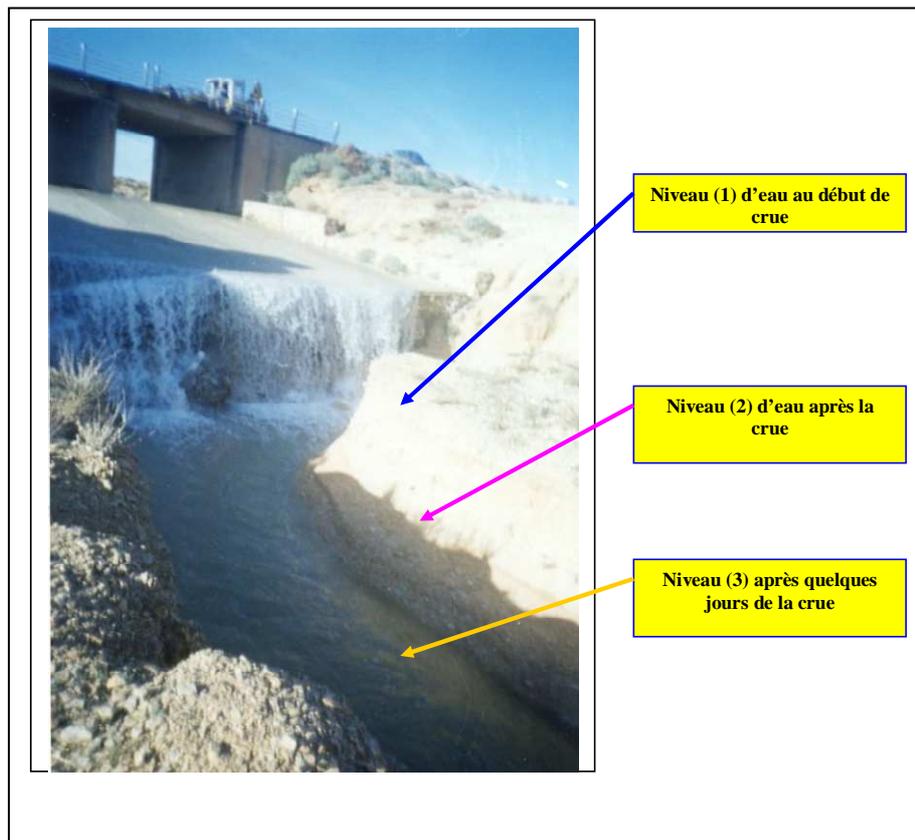


Figure 22: Niveaux d'eau dans l'Oued pendant et après la crue[76,77,78,79,80,81]

III. Proposition de réalimentation artificielle de la nappe Ain chabro-Tébessa

La détermination du meilleur site possible pour une opération d'alimentation artificielle est soumise à une étude hydrogéologique précise afin d'assurer une rentabilité économique maximale. En effet, le choix d'un procédé d'alimentation artificiel dépend de plusieurs paramètres qu'il convient de bien définir :

- Topographie du site (terrains plats ou accidentés) ;
- Géologie et hydrogéologie (nature et profondeur de l'aquifère, perméabilité des terrains, profondeur de la nappe souterraine) ;
- Volumes d'eau disponibles et variabilité des débits dans le temps ;
- Données économiques (superficie des terrains disponibles et leur prix d'achat, etc.)
- Caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques des eaux de recharge et leur compatibilité avec les terrains et l'eau souterraine.

La recharge artificielle des nappes souterraines a donné des résultats très encourageants dans les différents pays du monde, notamment dans les pays maghrébins. Par exemple, en Tunisie, cette technique a commencé au début des années 1980. Ils ont tenté même de réutiliser des eaux usées épurées à la recharge des nappes superficielles.

Au Maroc, elle est largement expérimentée depuis plus de 30 ans avec des résultats excellents. En Algérie, cette technique est très peu pratiquée ; la seule application a eu lieu le 27 avril 1998 par des campagnes de lâchers des eaux du barrage de Boukourdane (Ouest d'Alger) pour recharger la nappe alluviale de Oued El Hachem dont le volume total infiltré est de $52,3\text{m}^3$, soit une infiltration de 10,87% du volume lâché [67]

Dans la Wilaya de Tébessa, pour répondre aux conditions de recharge artificielle des nappes, nous avons pensé à étudier les possibilités de la récupération des eaux de précipitation (notamment

les eaux des crues) d'oued Bouakous pour la recharge artificielle du sous système aquifère Ain – Chabro-Tébessa. La technique proposée est basée sur l'augmentation de l'infiltration efficace du sol, par des galeries verticales de profondeur 30 m et remplies par des graviers (\varnothing 2-5 mm)[76,77,78,79,80,81]

1. Plan général de la technique de recharge artificielle proposée : Pour le cas particulier de la W. de Tébessa, et pour répondre aux conditions de la réalimentation artificielle des nappes, nous avons choisi de traiter les possibilités de la récupération des eaux de précipitation (en particulier les eaux des crues) d'oued Bouakous pour la recharge artificielle de la nappe Tébessa Ain -Chabro.

La technique proposée est basée sur l'augmentation de l'infiltration efficace du sol (ce paramètre est estimé à 53 l/s, ce qui représente un volume d'eau infiltré pendant deux mois égal à 0.27 Mm³). Il faut noter que ce plan, a été proposé par un ingénieur indien pendant les années 1980 [D.H.W.Tébessa] et n'a été pris en considération que l'année 2002/2003.

Le plan de projet comprend deux étapes à suivre comme suit [76,77,78,79,80,81] :

1-Etape N° 1 : réaliser une digue (barrières) sur le lit amont de l'oued Bouakous pour (Fig.23) :

- diminuer le maximum d'apport solide, donc de limiter le phénomène d'érosion dans cette région (réduction à 50 %) ;
- de casser la vitesse des eaux, particulièrement les eaux de crues, donc de réduire d'éventuels problèmes d'inondation.

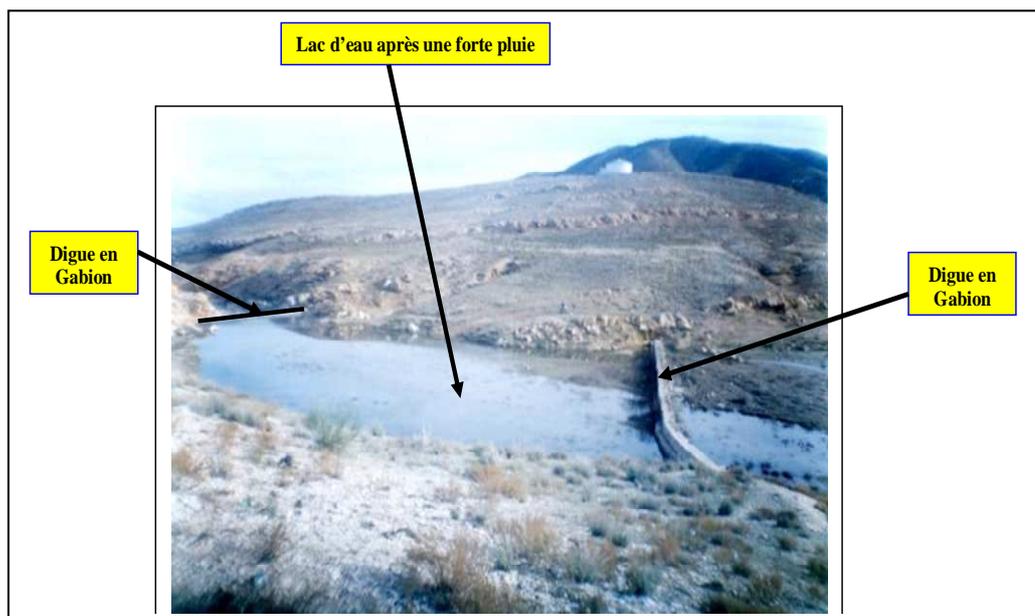
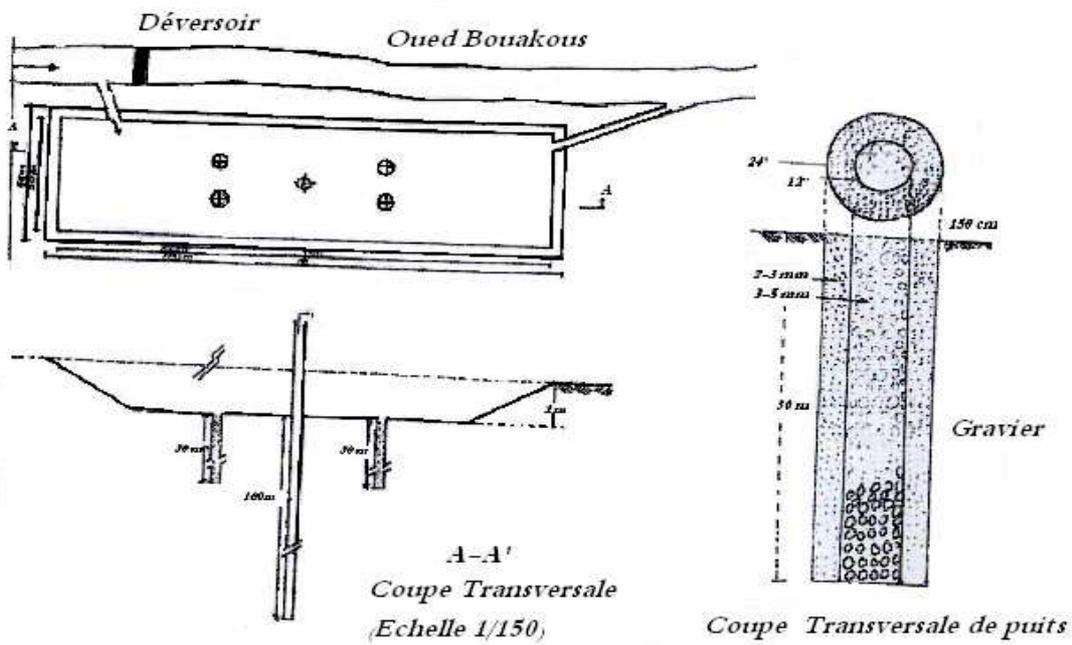
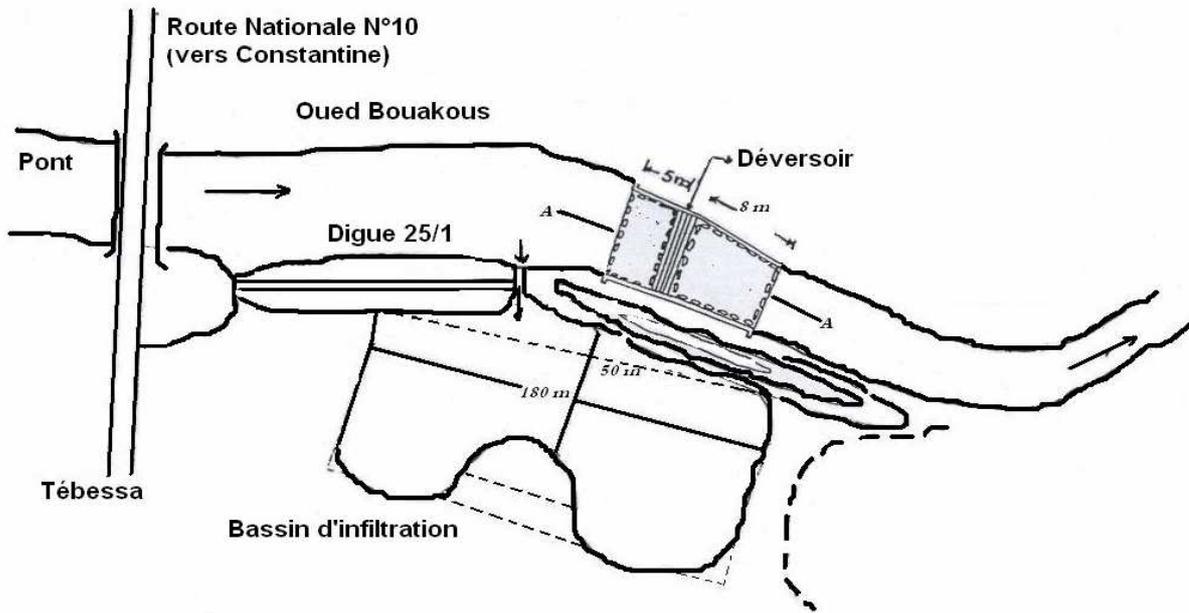


Figure 23 : Lac d'eau formé en amont de oued Bouakous après une forte pluie dans la région de Hammamet (Février/Mars 2005) [76,77,78,79,80,81]

2-Etape N°2 : Elle est formée des étapes suivantes (Fig. 24,25) :

- Construction d'un déversoir de 10 m de longueur et de 2 m de hauteur à travers l'oued Bouakous ;
- Mise à jour d'un canal pour laisser l'eau passer dans le bassin de dimension 200*50*2(m) ;
- Construction de 4 puits verticaux dans le bassin ayant chacune être une profondeur de 30 m et de diamètre de 60 cm, remplies de graviers (\varnothing 2-5 mm) où l'eau doit stockée puis s'infiltrer ;
- Réalisation d'un ouvrage de contrôle pour régulariser l'eau de l'oued en direction du bassin d'infiltration.

Plan schématique de l'ouvrage de recharge artificielle de la nappe Ain-Chabro



Plan d'emplacement du bassin
d'infiltration proposé (Echelle 1/1500)

Figure 24,25 : Plan schématique de l'ouvrage proposé [76,77,78,79,80,81]

Malgré toutes les précautions que l'on peut prendre et quel que soit le dispositif retenu, la réussite et la pérennité d'un ouvrage de recharge artificielle sont fortement liées aux phénomènes inéluctables de colmatage qui se développent progressivement et finissent par stopper l'infiltration des eaux.

Il nous paraît essentiel de souligner que les données spécifiques relatives à chaque projet (caractères géologiques et hydrodynamiques du réservoir, régime des besoins et caractéristiques de la source d'alimentation) concourent dans chaque cas à la définition d'un schéma optimal, dans lequel l'implantation et le fonctionnement des ouvrages d'alimentation et de reprise auront un rôle fondamental.

Il est souvent impossible de déterminer ce schéma en l'absence d'un modèle de simulation des écoulements. Cependant, un suivi systématique des paramètres hydrogéologiques et hydrochimiques de la nappe en question serait nécessaire.

Pour augmenter le volume d'eau infiltré, nous proposons de multiplier le nombre de bassins d'infiltration (Fig.26)

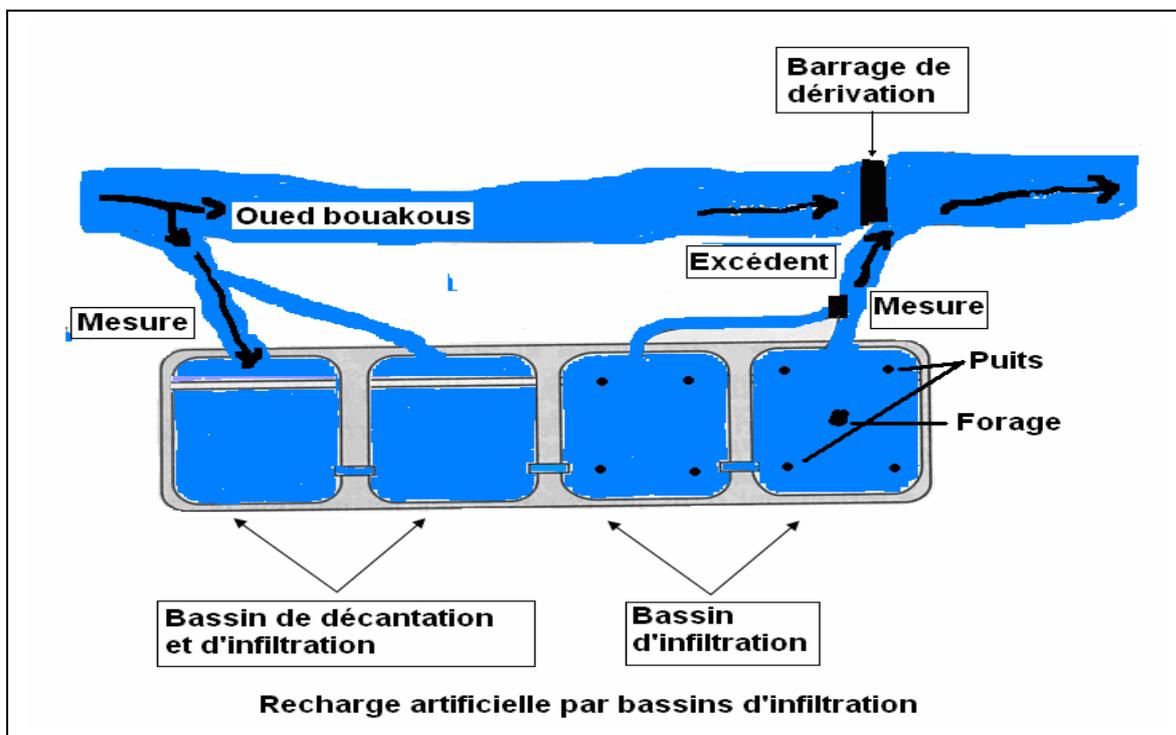


Figure 26 : Ouvrage proposé en multipliant le nombre des bassins d'infiltration [76,77,78,79,80,81]

Conclusion

La nappe phréatique de la région de Tébessa a subi une surexploitation très importante se traduisant par une baisse générale du niveau d'eau. Cette situation a provoqué une dégradation en quantité et en qualité de l'eau disponible. L'analyse des eaux a révélé une salinité importante d'origine géologique et a mis en évidence les effets négatifs de la pollution causée par l'homme (eaux usées rejetées sans traitement, décharges publiques)

On inspirant d'expériences réalisées dans d'autres pays, nous proposons d'utiliser la technique de recharge artificielle des nappes afin de profiter du volume considérable des eaux de crues, jusqu'à maintenant mal exploitées.

Pour le cas particulier de la W. de Tébessa, et pour répondre aux conditions de la réalimentation artificielle des nappes, nous avons choisi de traiter la possibilité de la récupération des eaux de précipitation (en particulier les eaux des crues..) d'oued Bouakous pour la recharge artificielle de la nappe Tébessa Ain -Chabro. La technique proposée est basée sur l'augmentation de l'infiltration efficace du sol (ce paramètre est estimé à 53 l/s, ce qui représente un volume d'eau infiltré pendant deux mois égale 0.27 Mm^3) par des bassins d'infiltrations et des galeries verticales de profondeur 30 m remplies par des graviers (\varnothing 2-5 mm). Pour augmenter le volume d'eau infiltré, nous proposons de multiplier le nombre de bassins d'infiltration

Notons que la réussite et la pérennité d'un ouvrage de recharge artificielle est fortement liées aux phénomènes inéluctables du colmatage qui se produisent progressivement et finissent par stopper l'infiltration des eaux.

Il est souvent impossible de déterminer ce schéma en l'absence d'un modèle de simulation des écoulements. Cependant, un suivi systématique des paramètres hydrogéologiques et hydro chimiques de la nappe en question serait nécessaire.

Conclusion générale

À l'achèvement de ce travail, nous concevons avoir contribué à une assez bonne connaissance des caractéristiques de la nappe Ain-chabro-Hammamet et la qualité des eaux qu'elle renferme.

La zone d'étude se situe à l'extrémité Nord-ouest de la W.Tébessa. Elle appartient au domaine de l'Atlas saharien oriental, aux confins Algéro-Tunisiens. Notre étude a couvert la région de Tébessa- Hammamet (Youks les Bains) sur une superficie d'environ 260 Km²

Du point de vue géologique la zone étudiée correspond à des formations autochtones constituée essentiellement de :

- très importantes assises carbonatées d'âge campanien ;
- divers recouvrement récents marquant le quaternaire.

La région d'étude fait partie du bassin d'effondrement de la plaine de Tébessa/Morsott/Hammamet, qui est comblé par des sédiments d'origine continentale, formées essentiellement par des alluvions anciennes et récentes, argiles, grès, cailloutis de calcaires. La dominance de ces formations a donnée une bonne perméabilité au sol. Ce bassin d'effondrement est entouré par des reliefs importants. Ceux-ci sont formées d'un ensemble de synclinaux à faciès prédominants calcaires et calcaires marneux qui s'étalent du Trias jusqu'au Maestrichtien.

Du point de vue climatologique, la région d'étude est caractérisée par un climat semi aride de type continental, avec un été très chaud et sec et un hiver très froid et humide. La moyenne inter annuelle des précipitations tombées sur la région d'étude est de l'ordre de 330mm à Tébessa et 298 mm à la station de Hammamet. Ces pluies sont souvent sous forme orageuses. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 15.91° C avec un maximum au mois de juillet égale 26.55°C et un minimum au mois de janvier égal à 6.50°C. Le cycle pluviométrique le plus arrosé correspond à l'année 2002-2003 avec un apport de 516 mm pour la station de Tébessa, et l'année (2003-2004) avec 610 mm pour la station de Hammamet. Au niveau de la station de Tébessa le cycle le plus sec correspond à l'année 83/84 avec un apport de 129 mm et pour la station de Hammamet correspond à l'année 1996/1997 avec 163 mm.

Les montagnes des bordures les plus élevées comme Dj.Mistiri et Dj. Tazbent et leurs prolongements, reçoivent en hiver des précipitations neigeuses très importantes, malheureusement il n'existe pas de relevé systématique d'observation.

Le bilan hydrique calculé selon la méthode de Thornthwaite présente un résultat déficitaire dans les deux périodes d'observations, car le déficit agricole était toujours supérieur aux excédents. En revanche, on peut considérer l'année 2002/2003 comme année excédentaire du fait de l'infiltration suffisante.

Dans l'étude hydrogéologique concerne la nappe alluviale de Tébessa/Hammamet nous avons constaté qu'elle est caractérisée par une superposition de haut en bas de cailloutis de calcaire, galets, grès et sables, graviers et argiles qui affleurent dans toute la plaine. Aux bordures SW et NE, il affleure des niveaux des calcaires maestrichtiens fissurés et séparés du reste des alluvions par des failles.

Selon la carte des conditions aux limites, l'alimentation de la nappe par les calcaires aux bordures est assez complexe. Cette dernière est due aux jeux de failles qui, dans certains endroits ont provoqué une discontinuité du niveau fissuré et l'apparition de marnes aux bordures. Par contre, une alimentation en profondeur est très probable à travers les failles à laquelle s'ajoute l'infiltration efficace des eaux des précipitations efficaces (PE) à travers le remplissage alluvionnaire qui affleure à la surface et qui est caractérisé par une perméabilité très forte favorisant davantage l'infiltration des eaux vers la nappe.

Ce système de grande potentialité aquifère est caractérisé par une morphologie piézométrique importante depuis les années 1970. Actuellement, le niveau piézométrique a beaucoup diminué et l'allure des courbes piézométrique est devenu plus irrégulière et reflète une surexploitation importante.

L'analyse des cartes de perméabilités et de transmissivités montre bien que la zone d'étude est dotée de bonnes caractéristiques hydrodynamiques.

L'interprétation hydro chimique des résultats a montré une forte salinité des eaux souterraines. Trois faciès chimiques dominants ont été observés, l'un bicarbonaté calcique dans les points d'eau proches des bordures carbonatées, et les autres points sont de faciès chloruré sodique et sulfaté calcique, caractérisant les points du centre et du Nord de la plaine.

La confrontation du contexte géologique de la région avec la répartition spatiale des éléments chimiques montre que l'origine de cette salinité est liée principalement à la dissolution de trois types de formations :

- évaporitiques des affleurements triasiques existants au niveau de Dj. Djebissa et aux pieds SE de Dj Belkif à la limite NW de la plaine ;
- carbonatées aux bordures SW de la plaine ;
- alluvionnaires au centre de la plaine.

La variation saisonnière de la concentration des éléments chimiques est liée à l'effet des conditions climatiques de la région (précipitations, évaporation), et à l'exploitation des ressources par pompage, et à l'irrigation.

L'analyse du diagramme $Ca^{+2}/(HCO_3^- + SO_4^{2-}) - Na^+/Cl^-$ a montré le phénomène d'échange de base entre les eaux de la nappe et les formations géologiques riches en argiles. Ce processus a été démontré par l'augmentation des teneurs en Na^+ par rapport à celle du Cl^- ainsi que par la diminution des ions du Ca^{2+} par rapport aux HCO_3^- et SO_4^{2-} .

Les analyses bactériologiques des eaux ont révélé que les concentrations maximales de coliformes totaux et fécaux dans les eaux de la nappe alluviale Tébessa- Hammamet s'échelonnent entre 39 et 1100 /100ml d'eau. Elles montrent que les eaux ont de fortes densités de bactéries fécales et pathogènes. Mais cette densité subit d'amples fluctuations spatiales du SW au NE de la plaine.

L'origine de cette pollution bactériologique varie d'un site à l'autre entre divers facteurs humains, animaux ou mixte. Il faut signaler que les eaux usées rejetées dans la nature sans traitement préalable constituent une source de pollution permanente et principale selon les normes de L'OMS, et les normes algériennes relative aux eaux de boissons qui recommandent que les micro-organismes isolés devraient être absents.

Les consommateurs de ces eaux s'exposent à des risques sanitaires à court terme. Ainsi, on recommande, donc, de protéger au mieux les ressources en eaux (sources, puits, forages) de toute pollution extérieure.

Nous avons constaté qu'il y a trois zones distinctes du point de vue de la vulnérabilité à la pollution, qui sont :

- **la zone de faible indice de contamination (3-6)** ; elle caractérise la zone de Hammamet, dans la partie ouest de la ville de Tébessa. Cette zone est faiblement vulnérable à la pollution éventuelle ;
- **la zone de moyen indice de contamination (6-9)** ; elle caractérise la zone de Ain chabro, dans la partie centrale de la plaine de Tébessa. Elle est donc moyennement vulnérable à la pollution ;
- **la zone de fort indice de contamination (10-19)** ; elle caractérise la partie Est de la plaine de Tébessa. Cela montre bien que cette partie de la plaine est très exposée et plus vulnérable à la pollution. Elle nécessite donc des mesures de protection très rapide.

Notons qu'au niveau de ces zones, l'épaisseur du remplissage quaternaire est importante et joue son rôle de protection. La carte du pouvoir épurateur établie a bien confirmé cette constatation. La pollution des eaux de la nappe est généralement ponctuelle et causée principalement par les rejets des eaux usées non traitées au niveau des oueds (connexions oued/ nappe) et dans quelques puits abandonnés.

Afin de garantir la qualité de l'eau distribuée à la population, nous devons recommander de protéger la nappe par simple contrôle de : décharges publiques, des eaux usées, des déchets agricole, et par l'application des périmètres de protection autour des captages d'eau.

La protection par des périmètres calculés est une protection complémentaire à celle prévue par la législation en vigueur sur les déversements des rejets, des écoulements, des dépôts directs ou indirects d'eau ou de matière. Il s'agit là de préserver les points de prélèvement d'eau des risques de pollution susceptibles de résulter d'installations diverses établies à leur proximité. Cette protection est alors réalisée par l'interdiction ou la réglementation de certaines activités sur les terrains situés autour des points de prélèvement.

La nappe phréatique de la région de Tébessa a subi une surexploitation très importante se traduisant par une baisse générale du niveau statique des eaux en profondeur. Cette situation a provoqué une dégradation en quantité et en qualité de l'eau disponible.

Pour palier à ce problème, il y a des solutions prévisibles à moyen, court, et long terme, parmi lesquelles on peut citer :

- Minimiser les pertes par réhabilitation des conduites de refoulement et de distribution ;
- Rééquiper des forages qui sont en panne ;
- Adopter un programme de distribution approprié ;
- Limiter le gaspillage d'eau par la sensibilisation des citoyens ;
- Recycler les eaux usées ;
- Réalimenter les nappes souterraines artificiellement ;
- Implantation des nouveaux forages destinés uniquement à l'industrie ;
- Établissement des retenues collinaires pour le secteur de l'agriculture ;
- Exécuter des ouvrages hydrauliques destinés à la recharge artificielle de la nappe.

On inspirant des expériences réalisées dans d'autres pays, nous proposons d'utiliser la technique de recharge artificielle des nappes afin de profiter du volume considérable des eaux des crues qui sont jusqu'à maintenant mal exploitées.

Pour le cas particulier de la W. de Tébessa, et pour répondre aux conditions de la réalimentation artificielle des nappes, nous avons choisi de traiter les possibilités de la récupération des eaux de précipitation (en particulier les eaux des crues..) d'oued Bouakous pour la recharge artificielle de la nappe Tébessa Ain -Chabro. La technique proposée est basée sur l'augmentation de l'infiltration efficace du sol (ce paramètre est estimé à 53 l/s, ce qui représente un volume d'eau infiltré pendant deux mois égale 0.27 Mm^3) par des bassins d'infiltrations et des galeries verticales de profondeur 30 m remplies par des graviers (\varnothing 2-5 mm)

Il faut noter que la réussite et la pérennité d'un ouvrage de recharge artificielle sont fortement liées aux phénomènes inéluctables de colmatage qui se produit progressivement et finit par stopper l'infiltration des eaux. Cependant, les données spécifiques relatives à chaque projet comme les caractères géologiques et hydrodynamiques du réservoir, le régime des besoins et caractéristiques de la source d'alimentation, concourent dans chaque cas à la définition d'un schéma optimal dans lequel l'implantation et le fonctionnement des ouvrages d'alimentation et de reprise ont un rôle fondamental. A ce niveau, nous recommandons de compléter la recherche sur le phénomène de colmatage des bassins d'infiltration, qui nécessiterait une étude plus détaillée sur des modèles réels et simulés en fonction des conditions du terrain.

Finalement, il serait souhaitable de développer cette étude et de l'appliquer à plus grande échelle aux nappes aquifères qui connaissent des problèmes similaires de surexploitation.

Références bibliographiques

1. Ababsa Z.2006. Contribution à l'étude de la qualité chimique des eaux souterraines du sous système aquifère Ain chabro-Hammamet : Analyse et traitement statistique. Mémoire fin d'étude d'ingénieur, CUT, 105P.
2. Abdelkader El Garouani .2004. Approche géomatique pour la délimitation des périmètres de protection des ressources en eau souterraines (champ captant). Sécheresse, volume 1E, numéro 2 (décembre 2004)
3. Abu-Taleb. M.F. The use of infiltration field tests for groundwater artificial recharge. Environmental Geology 37(1-2)January 1999,64-71
4. Allan R. Freeze;John A.Cherry, 1979.Groundwater. Prentice-Hall,Inc.Englewood Cliffs,N.J.,604P
5. Anonyme (1922) .Carte d'Algérie au 1 / 50000 type 1922
 - Carte topograohique et géologique de Morsott N°178
 - Carte Topographique et géologique de TEBESSA N° 206
 - Carte Topographique de Youks les bains N° 205
 - Carte topographique et géologique de Meskiana N°177
6. Anbazhagan S.Ramasamy S.M.,Das Gupta S.(2005),Remote sensing and GIS for artificial recharge study ,runoff estimation and planning in Ayyar basin,Tamil Nadu,India. EnvironGeol(2005)48:158-170
7. Bel F.1990. La production d'eau potable par réalimentation de nappe : un procédé original utilisé en Haute-Garonne. ADOUR-GARONNE/N°46/1990. P15-18.
8. Bernard Legube.1996. Le traitement des eaux de surface pour la production d'eau potable. Guide technique de l'Agence de l'eau loire-Bretagne, ,198P
9. Bize J. ; Bourguet L. ; Lemoine J. 1972. L'alimentation artificielle des nappes souterraines. Éditions Masson, 199 P.
10. Bouchagoura L . 2003. Mise en evidence des diverses pollutions dans la nappe alluviale de Tebessa .Th.Magister. Unive. D'Annaba.78P.
11. Boukous Z., Bouragaa N. Stratégie de la gestion des eaux dans le sous –bassin versant de oued chabro (mémoire de fin d'étude CU Tébessa 1997) ,59P
12. Boutaleb Saïd 1 & Lhoussaine Bouchaou 2. 2006. Etude de faisabilité de la recharge artificielle des formations calcaires en zone semi-aride. Cas de l'oued Tagmoute, (Anti- Atlas occidental, Maroc). Actes du 8e colloque d'hydrogéologie en pays calcaire, 2006, Neuchâtel, Suisse - ISBN 2-84867-143-2 © Presses universitaires de Franche-Comté, Université de Franche-Comté, 2006, Édition en ligne, N. Goldscheider, J. Mudry, L. Savoy & F. Zwahlen, éditeurs – 268 pages
13. Brassington R.1988.Field Hydrogeology. Geological Society of London Professional Handbook, 175P
14. Brinis Nafaa.2003.Essai d'explication de la salinité des eaux de la nappe du Moi-pliocène :cas de la zone Est de la plaine d'el-outaya,w.Biskra. Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, 102P
15. Castany G. (1968) : Principe et méthode hydrogéologique (DUNOD , Edit , Paris ; 236 Pages)
16. Compagne générale de géophysique (C .G .G) 1971 ; L'étude par prospection géophysique dans la plaine de Tébessa – Morsott ; Ministère de l'hydraulique (Algérie)
17. Chabani Othmane. Approche à l'étude des causes et remèdes d'abaissement des réserves en eaux souterraines dans le champ captant Meddoud- Ain chabro, mémoire de fin d'étude, Ingénieur d'état, hydrogéologie, CUT , Tébessa, 2002.41P
18. Cheh-Shyh Ting,Tienfuan Kerh, Chiu-Jung Liao. Estimation of groundwater recharge using the chloride mass-balance method,pingtung plain,Taiwan. Hydrogeology Journal(1998)6:282-292
19. Chorfi W.,Moheidine S.,2005.Contribution à l'étude hydrogéologique et bactériologique de la nappe aquifère Tébessa-Hammamet, NW de la W.Tébessa. Mémoire fin d'étude d'ingénieur, CUT,97P
20. Collin J.J., 2004. Les eaux souterraines : connaissance et gestion. BRGM Editions et Hermann éditeurs des sciences et des arts,169P.
21. De la Vaissière R.2006. Etude de l'aquifère néogène du Bas-Dauphiné, Apports de la géochimie et des isotopes dans le fonctionnement hydrogéologique du bassin de Valence (Drome, SE de la France).Th.Doct.Univ.d'Avignon et des Pays de Vaucluse.278P
22. De Marsily G. 1981. Hydrogéologie quantitative. Edition Masson.
23. Debieche T .H. 2002. Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle, Application à la basse plaine de la seyousse –NE Algérien. Th. Doct.Université de Franche-Comté,199P.
24. Detay M. D.1997 .la gestion active des aquifères. Masson éditions, Paris, P416.

25. Djedid M. ; Zouari F.S. 2001. Etude lithostratigraphique et tectonique de koudiat el kouratz Dj. Mestiri-Tébessa. Mémoire fin d'étude d'ingénieur, CUT, 49P
26. Dillon, P., Pavelic, P., Toze, S., Ragusa, S., Wright, M., Peter, P., Martin, R., Gerges, N., and Rinck-Pfeiffer, S. (1999). Storing recycled water in an aquifer: benefits and risks. Aust Water & Wastewater Assoc. J. Water 26(5) 21-29.
27. Dillon, P.J. and Pavelic, P. (1996). Guidelines on the quality of stormwater and treated wastewater for injection into aquifers for storage and reuse. Urban Water Research Assoc of Aust., Research Report No 109, July 1996, 48pp.
28. Dillon Peter and Robert Molloy. 2006. Developing Aquifer Storage and Recovery (ASR) Opportunities in Melbourne : Technical Guidance for ASR. Prepared for the Victorian Smart Water Fund With support from CSIRO Water for a Healthy Country Flagship Program. CSIRO Land and Water Science Report 4/06; February 2006 ;ISSN 1833-4563.
29. Dillon Peter .Future management of aquifer recharge. Hydrogeology Journal(2005)13:313-316
30. Durosoy (1956) .Carte géologique de TEBESSA N° 206 et notice de carte
31. Furry V. 1997. Gestion et protection des eaux souterraines. Mém. D.E.S.S., Univ. Picardie, 30 p.
32. Duband. D. 1973. Hydrologie approfondie: statistique Appliquée. Institut National Polytechnique de Grenoble,
33. Gil M. 2002. Chimie des eaux naturelles : Principes de géochimie des eaux. Éditions publisud. 289p.
34. Gilli E ; Mangan Ch. ; Mudry J., 2004. Hydrogéologie : objets, méthodes, applications. Dunod Editions ; 303P.
35. Gouaidia L. 2000. Approche hydrochimique d'une nappe en zone semi aride, cas de la nappe alluviale de la plaine de Tébessa extreme NE Algérien. Th. Magister. Unive. d'Annaba. 87P.
36. Guillemin C. ; Roux. J.C. 1992. Pollution des eaux souterraines en France. Éditions BRGM. 180P.
37. Hacini youcef. 2003. Caractérisation des eaux souterraines de la plaine de Ain Oussera, Algérie : étude hydrochimique et application des méthodes isotopiques. Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, 82P
38. Hamill L. and F.G. Bell. Groundwater Ressource Developpement. Butterworths edition, 343 P, 1986
39. Halfaya Naima. 1999. Etude générale de protection des zones inondables des sous bassins oust de la ville de Tébessa. Mémoire fin d'étude d'ingénieur, CUT,
40. Herman Bouwer. Artificial recharge of groundwater : hydrogeology and engineering. Hydrogeology Journal(2002)10:121-142
41. Hydrogeology Journal, Theme Issue : Groundwater Recharge. Volume 10-Number 1-February 2002
42. Hiscock Kevin. 2006. Hydrogeology : principles and practice. Blackwell publishing édition, 389P.
43. Jafar Ghayoumian, B. Ghermezcheshme, S. Feiznia, A. A. Noroozi. Integrating GIS and DSS for identification of suitable areas for artificial recharge, case study Meimeh basin, Isfahan, Iran. Environ Geol(2005)47:493-500
44. Janina S. Klaus; Bent T. Hansen; Somkid Buapeng, 2007. Sr87/Sr86 ratio: a natural tracer to monitor groundwater flow paths during artificial recharge in the Bangkok area, Thailand. Hydrogeology journal(2007)15:745-758
45. Juerg M. Matter, H. N. Waber, S. Loew, A. Matter. Recharge areas and geochemical evolution of groundwater in an alluvial aquifer system in the sultanate of Oman. Hydrogeology Journal(2005)14:203-224
46. Katharine L., Jacobs James M. Holway, 2004. Managing for sustainability in an arid climate: lessons learned from 20 years of groundwater management in Arizona, USA. Hydrogeology Journal(2004)12:52-65
47. Khepar S. D., A. K. Yadav, S. K. Sondhi, Arpan Sherring. Modelling surplus canal water releases for artificial recharge of groundwater through surface drainage systems. IrrigSci(2000)19:95-100, Spring verlag 2000
48. Kowalski, W.M., Boudoukha A., Hemila M.L., Pharissat A. 1997. Les stades d'effondrement du graben de Tébessa (confines Algéro-Tunisiens) et la tectonique plicative Plio-Quaternaire. Pub. Soc. Hist. Nat. Montbéliard. PP 201-215.
49. Lallemand-Barres A, Roux JC. Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine. Collection Manuels et Méthodes, N° 19. Orléans : Bureau de ressources géologiques et minières (BRGM), 1989 ; 224 p.
50. Lallemond-Barrès andrés. 1995. Méthodes de dépollution des eaux souterraines. Éditions BRGM, 180P.

51. Laura Sigg, Philippe Behra, Werner Stumm. Chimie des milieux aquatiques: chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement. 2006. Dunod édition, 4ème édition, 564P
52. Mahaad I. Shammass, 2007. The effectiveness of artificial recharge in combating seawater intrusion in salah coastal aquifer, Oman. *Environ Geol*, DOI 101007/S00254-007-0975-4
53. Margat J. 1994. Les ressources en eaux : manuels et méthodes. BRGM éditions, 144P.
54. Martel R, Paradis D, Murat V, et al. Protection des aquifères : vulnérabilité et périmètres de protection autour des puits. 3^e conférence biennale, Americana, Montréal, 24-26 mars 1999 : 375-6
55. Martinez-Santos P., P. Martinez-Alfaro, J.M. Murillo. A method to estimate the artificial recharge capacity of the Crestatx aquifer (Majorca, Spain). *Environ Geol* (2005) 47:1155-1161
56. Martin-Rosales W., J. Gisbert, A. Pulido-Bosch, A. Vallejos, A. Fernandez Cortès. Estimating groundwater recharge induced by engineering systems in a semi arid area (Southeastern Spain). *Environ Geol* (2007) 52:985-995
57. Masri Tarek. 2002. Caractérisation et analyse de la fracturation dans la vallée de Youkous. Mémoire fin d'étude d'ingénieur, CUT, 52P
58. Medouri A. 1999. Estimation du taux de fixation des nitrates (NO₃), l'acide acétique (CH₃COOH), et de l'acide chlorhydrique (HCL) sur l'argile brute de la plaine de Tébessa. Mémoire fin d'étude d'ingénieur, CUT, 35P.
59. Merah ; N. ; Rouabhia H. (1997) « Etude de la Réalimentation de la Nappe Tébessa-Morsott à partir de Oued Bouakous » Mémoire de fin d'étude (DEUA, Hydrogéologie), C.U.T. Tébessa Institut des Sciences de la Terre.
60. Monier T. ; J. Prome et Y. Fori. 1991. Un essai de recharge de la nappe phréatique en basse Ariège : un complément de ressource pour l'irrigation. *ADOUR GARONNE / N°50/1991P9-12.*
61. Mouici M., Chetouh N., Bendib S. 1991. Synthèse géologique et géotechnique de la vallée de bouakous-Hammamet. Mémoire fin d'étude d'ingénieur, CUT, 165P
62. Muzaffar M., Eusuff and Kevin E. Lansey. Optimal operation of artificial groundwater recharge systems considering water quality transformations. *Water Resources Management* (2004) 18:379-405
63. Nives Stambuk-Giljanovic, 2001. The quality of water in the Busko Blato Reservoir. *Environmental Monitoring and Assessment* 71:279-296
64. Paradis D, Martel R, Lefebvre R, Michaud Y. Comparaison des méthodes de détermination des périmètres de protection d'ouvrages de captage d'eau souterraine dans le piémont Laurentien. Abstract Volume, Joint meeting GAC, MAC, APGGQ, IAH, CGU, May 18-20, Quebec, 1998 : A-141
65. Paul M. Santi, John E. Mc Cray, Jamie L. Martens. Investigating cross-contamination of aquifers. *Hydrogeology Journal* (2006) 14:51-68
66. Rassoul T. 1999. Analyse structurale de la bordure sud occidentale de Dj. Belkif. Mémoire fin d'étude d'ingénieur, CUT, 30P
67. Remini B. 2005. La problématique de l'eau en Algérie. Edition Office des Publications Universitaires.
68. Rodier J. 1997. Analyse de l'eau (eaux naturelles, résiduelles eaux de mer). Edition 8, 1500p.
69. Rognon, P. 2000. Comment développer la recharge artificielle des nappes en régions sèches ? *Revue Science et Changement Planétaires / Sécheresse*, Vol, 11, Numéro 4, Décembre 2000.
70. Salemi A. 1996. Etude de la relation Oued-Nappe : cas de l'oued el kébir et la nappe alluviale de Tébessa. Mémoire fin d'étude d'ingénieur, CUT, 80P
71. Sayed-Farhad Mousavi, Vafa Rezai. Evaluation of scraping treatments to restore initial infiltration capacity of three artificial recharge projects in central Iran. *Hydrogeology Journal* (1999) 7:490-500
72. Seghir, K. 2001. Les géosynthétiques et la protection de l'environnement. 1^{er} Séminaire National de Génie Civil, le 27/28/Mai 2001 au Centre Universitaire de Tébessa.
73. Seghir, K. 2001. Comparaison entre les filtres granulaires et les filtres en géotextiles dans les systèmes de drainage : Etude expérimentale impliquant le sable de Oum Ali (Sud-Est Algérien). Colloque International – Oasis, Eau, Population, le 22, 23, 24 Septembre 2003. Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface (LARHYSS). Université de Biskra, Algérie.
74. Seghir, K. 2004. Recherche d'un compromis entre le colmatage et le lessivage lors de l'utilisation des géotextiles pour remplir une fonction hydraulique : étude expérimentale impliquant le sable de Oum Ali, SE, W. Tébessa, Algérie. 1^{er} Séminaire National sur les Sciences de la Terre au Service du Développement Durable, le 26 et 27 Avril 2004, au Centre Universitaire de Tébessa.
75. Seghir, K. 2005. Contribution des géosynthétiques au renforcement des versants instables : Quelques exemples pratiques. Séminaire International sur les risques naturels lié aux glissements de

- terrain et d'éboulement rocheux le 15-16 Novembre 2005. Laboratoire de génie civil et d'hydraulique. Université 8 Mai 45 Guelma.
76. Seghir K.; Khérici N.2003.Proposition d'alimentation artificielle du système aquifère Tébessa-Ain chabro par l'oued Bouakous-Hammamet. communication aux journées d'études sur la géologie algérienne, université d'Oran, décembre 2003.
 77. Seghir K.; Khérici N.2004.Perspectives de développement de la réalimentation artificielle des nappes souterraines dans les régions semi-arides : cas de la nappe alluviale Ain-Chabro _ Tébessa (Est Algérien) .Colloque International « TERRE_EAU », le 4, 5,6 Décembre 2004 à l'université d'Annaba.
 78. Seghir K.; Khérici N.2006. Perspectives de développement de la réalimentation artificielle des nappes souterraines dans les régions semi-arides : cas de la nappe alluviale Ain-Chabro _ Tébessa (Est Algérien) crestra, Biskra, Algérie
 79. Seghir K.; Khérici N.2006. Proposition d'alimentation artificielle du système aquifère Tébessa-Ain chabro par l'oued Bouakous-Hammamet.1er Séminaire International sur les Sciences de la Terre au Service du Développement Durable, le 26 et 27,28 Novembre 2006, au Centre Universitaire de Tébessa.
 80. Seghir K.; Khérici N.2008. Impact de la sécheresse sur les ressources hydriques dans une région semi-aride. Caractérisation hydrogéologique, hydrochimique, bactériologique: Cas de la nappe alluviale Ain chabro-Hammamet (Nord Est Algérien). Réunion des Sciences de la Terre, du 21-24 Avril 2008, Nancy, France.
 81. Seghir,K.2008.La réalimentation artificielle des nappes phréatiques dans le Nord-Est Algérien.Visions croisées, Université Joseph Fourier, Grenoble,France, Mai 2008,P8, 9.
 82. Seghir K.Khérici N.2008. Contribution to the Study of the Origin of Salinity in Alluvial Aquifer System in the Ain chabro-Hammamet (North-East ALGERIA).American Journal of Environmental Sciences 4 (6): 708-716, 2008, ISSN 1553-345X,© 2008 Science Publications.
 83. S.Kachi ; Khérici N.; Kachi N.2007.Vulnerability and Pollution Risks in the Alluvial Aquifer of Tebessa-Morsott. American Journal of Environmental Sciences 3 (4): 218-223, 2007.ISSN 1553-345X, © 2007 Science Publications.
 84. Touam N. Piézometrie de la nappe aquifère Tébessa-Hammamet pour la période des hautes eaux de l'année 2003/2004. Mémoire fin d'étude d'ingénieur, CUT.
 85. Tudor M.Botzan, Angelica I.Necula, Miguel A.Marino and Hakan Basa-gaoglu. 1999. Benefit-cost model for an artificial recharge scenario in the San Joaquin Valley, California. Water Ressources Management13:189-203P
 86. Valiron F. 1990. Gestion des eaux : principes, moyens, structures. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées. 350P.
 87. Valiron F.1985. Gestion des eaux : alimentation en eau, assainissement. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées. 550P.
 88. William Bajjali. Recharge mechanism and hydrochemistry evaluation of groundwater in the Nuaimh area,Jordan,using environmental isotope techniques. Hydrogeology Journal(2006)14:180-191P
 89. Yagoub, A. Ferdjallah, M.1997. Situation Actuelle de l'Approvisionnement en Eau et Besoins Futurs dans la Wilaya de Tébessa .Mémoire de fin d'étude (Ingénieur d'état en Hydrogéologie) , C.U.T. Tébessa Institut des Sciences de la Terre.

Annexe

Annexe 1

1/ Précipitation moyenne mensuelle de la station de Tébessa

Mois année	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv.	Fève	Mars	Avr	Mai	Juin	Jui	Août	total
83/84	6.2	18.5	22.2	14.5	16.9	0.4	12	16.6	5.1	6	0	108	129.2
84/85	9.9	23.6	15.3	47.3	18.8	18.8	44.4	17.6	57.9	24.9	0	5.6	284.1
85/86	67.8	15.1	3.1	4	13.8	11.1	67.1	2.6	18.7	10.1	69	3.1	285.5
86/87	25.8	42.9	35.6	19.7	8	19.6	52.4	12.1	23.1	1	30.5	2.2	272.9
87/88	7.7	17.4	28.5	11.8	13.8	1.5	28.9	24.7	49.1	69	1	3.1	256.5
88/89	15.6	17.3	28.5	25.9	15.8	3.5	15.6	16.8	4.1	94.5	10.7	68.2	316.5
89/90	29.1	14.1	15	11.1	117.2	0	34.1	52.6	79	11.1	24.7	78.8	466.8
90/91	23.3	13.9	81.4	65.6	24	4.5	73.9	32.2	74.7	16.6	2.4	65.6	478.1
91/92	79	22.8	15.1	19.9	17.5	23	23.1	19.6	69.1	24.4	7.5	2.8	323.8
92/93	32.2	29.3	45.9	18.2	2.1	31.1	3.1	4	18.6	17.4	10.5	7	219.8
93/94	20.4	4.2	14.9	19.1	24	12.8	20.1	18.8	39.8	4	6.9	0	185
94/95	3.6	94.6	1.1	3.8	26.2	0	37.8	19.4	27	39.6	0	28.4	281.5
95/96	17.8	34.9	34.3	22.7	30.8	88	67.4	62.9	24.2	41.7	19.6	25.7	470
96/97	13.1	7.2	6.9	15	30.1	7.4	20.9	51.3	25.4	1.5	11.3	12.7	202.8
97/98	53.3	62.7	39.3	23.5	21.5	12	34	24.9	12.2	38.1	0	15.6	337.1
98/99	49	34.9	42.4	15.4	71.7	10.3	48.7	6.9	17.6	10.7	17.8	30.5	355.9
99/00	20.2	25.4	73.7	25.4	6.9	3.5	7.1	15.1	70.5	78.1	17.5	16.2	359.6
00/01	5.8	13.2	14.7	8.6	20.2	14.8	12.2	1	40.8	78.1	17.1	16.2	242.7
01/02	56.6	17.5	20.9	7.8	13.8	10.3	9.7	25.8	42.8	23.9	59.5	93	381.6
02/03	34.1	40.5	76	28.5	127	38	17.7	95.8	28.6	4.3	2.8	23.1	516.4
03/04	23.3	9.8	105.2	8.3	19.1	2.3	91.2	24.9	49.7	88.8	16.4	32.5	471.5
moyen	28.27	26.65	34.28	19.81	30.43	14.9	34.35	25.98	37.04	32.56	15.50	30.39	330.16

2/ Température moyenne mensuelle de la station de Tébessa 83/84-03/2004 durant 21 ans

Mois année	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv.	Fèv.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Jui.	Août	Moyen annuel
83/84	21.6	15	12.2	7.2	4.7	6.7	9.3	15.3	18.9	22.5	27.1	26	15.54
84/85	20.6	14.5	12	6.4	6.1	6	8.5	13	17	23.1	26.1	25.1	14.87

85/86	20.4	15.7	13	8	5.4	10.4	8.3	14.2	16.9	25.1	27.7	25.6	15.89
86/87	21	16.6	10.2	6.4	6.3	8.1	9.4	13.7	19.9	22	25	26.8	15.45
87/88	23.6	19.3	10.7	10.5	6.3	7.7	8.8	14.3	16.7	24.3	26.7	27.9	16.4
88/89	20.6	18.2	11.6	5.8	8.2	7.4	9.9	14.8	20.5	22.5	28	26.7	16.15
89/90	22.2	15.5	13.4	10.7	5.4	7.2	11.5	13.7	18.2	20.9	25.6	28.1	16.03
90/91	24.1	20	11.5	5.5	6.1	10.4	10.4	12.7	17.2	24.9	28.5	24.1	16.28
91/92	21.8	16.7	10.5	5.5	9.5	6.8	11.6	10.9	14.2	21.9	26.3	25.6	15.11
92/93	21.9	18	12.1	7.8	4.7	6.7	9.4	11.8	16.3	20.9	23.5	25.7	14.9
93/94	22.3	19.1	11.1	7.7	5.2	5.6	8.7	19.9	19.2	27.8	26.7	28.1	15.95
94/95	23.6	6.7	13.2	8.1	7.5	8.9	11.9	11.8	21.9	24.2	27	28.6	16.12
95/96	24.1	16.3	11.3	9.8	5.7	10.3	9.2	12.7	20.1	22.9	27.1	29.6	16.59
96/97	20.3	15	12.4	10.2	9	6.3	10.1	12.4	18.2	20.8	25.9	26.6	15.6
97/98	20.6	17	11.8	8.5	8.7	9.3	9.3	12.2	14.2	22.8	25.9	25.2	15.46
98/99	23.2	15	10.2	6.3	7.2	8.2	9.8	15.1	17.7	24.6	27.8	25.7	15.9
99/00	23.6	19.2	11.1	7.1	7.1	5.8	10.2	14.9	22.1	25.8	26.2	28.9	16.83
00/01	22.1	15.9	12.8	9.4	4.1	7.8	11.7	16.1	21	22.4	27.5	26.8	16.17
01/02	22.3	21.1	11.8	6.8	8	7.5	15.6	14	19.6	25	28.4	27.1	17.27
02/03	21.2	17.8	12.4	8.8	6.3	9	12.5	15	19.4	25.1	26.6	24.9	16.58
03/04	19.9	16.8	10.7	4.3	5.15	5.05	7.05	7.00	16.3	22.69	26.35	25.55	13.90
moyen	21.95	16.63	11.71	7.65	7.11	7.67	10.15	13.30	18.35	23.29	26.66	26.55	15.91

3/ Moyenne mensuelle de précipitation en (mm) durant 21 ans (83/84-03/04) » Hammamet

Mois année	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv.	Fève	Mars	Avr	Mai	Juin	Jui	Août	total
83/84	2	31.3	24	11.7	12.6	27.5	22.2	21.7	4.8	7.9	0	17.6	183.3
84/85	29.3	72.6	27.1	58.8	23.6	9.2	57.2	4.2	66.0	3.8	4.5	1.8	385.1
85/86	36.8	22.1	3.7	16.5	22.7	12.3	84.4	1.6	198	29.7	42.9	10.1	302.6
86/87	31.9	30.6	26.3	15.3	6.7	19.7	62.2	6.2	19.3	0	14	2.2	234.4
87/88	15.2	18.7	24	10.1	11.9	4.7	24.1	28	32.4	47.7	1.7	14.3	232.8
88/89	15.1	35.5	12	32.6	14.2	8.7	9.6	10.4	10	73.6	0	39.5	261.2
89/90	35	4	16.8	28.8	131.4	0	44.7	35.2	77.6	14.4	7.4	61.6	456.9
90/91	38.9	10.8	103.3	58.4	18.5	21.9	85.7	37.9	74.3	22.6	6.3	0.5	479.1
91/92	39.3	37	31.7	14.5	30.4	33.5	51.3	35.1	83.1	13.5	16.9	0.5	386.8

92/93	12.6	33.4	61.6	48.4	9.3	27.9	21.4	2.6	41	12.8	20.1	1.8	292.9
93/94	22.7	3.8	16.6	28.7	31	23.9	19.4	23.3	7.4	2.4	1.3	4.5	185.2
94/95	3.9	29.9	16.8	2.7	40.4	0.4	17.9	17.2	1.2	73.6	0.3	27	215.3
95/96	91.3	12.4	1.2	7.9	31.6	54.5	55.2	43.5	16.2	12.6	8.1	12.1	352.3
96/97	18.2	3	6.9	3.9	2.3	15.7	9.3	25.8	2	0.8	46	13.2	163.4
97/98	59.2	46.5	2.5	15.7	11	13.3	32.9	36.6	25.6	26.7	0	3	286.4
98/99	29.3	37.5	15.9	7.2	72.8	3.6	5	4.7	2.8	20.8	7.1	40.7	260.9
99/00	11.2	11	29.5	29.5	9.1	3.5	7.1	15.2	63.7	36.5	1.2	1.5	264.7
00/01	26.3	8.6	5.1	5.1	14.3	16.6	10	1.6	38.9	0	7.9	32.2	166.2
01/02	25.5	14	3.2	3.2	2.4	2.5	0.5	21.3	23.7	9.9	16.2	43.3	182.1
02/03	11	53	17.4	17.4	87.5	24.3	17.3	83.5	25.4	9	7.4	4.5	386.3
03/04	19.4	59.7	75.0	75.0	10.1	1.6	57	20.5	224.2	83.6	9.5	0	610.8
moyen	27.35	27.47	23.4	23.4	29.26	15.48	33.05	22.67	40.93	23.89	10.41	15.8	298.31

Annexe 2

Tableau 1 : Description de la lithologie de la zone d'étude (logs des forages)

Nom du Forage	Lithologie	caractéristiques		
		N.S (m)	DEBIT(l/s)	TRANSMISSIVE (m ² /s)
F3 (Ain chabro)	<ul style="list-style-type: none"> -Terre argileuse. -Cailloutis de calcaires gros et moyen avec quelque quantité d'argile . - Cailloutis de calcaires et argile brune . - Cailloutis de calcaires et argile brune . -Argile + quelque cailloutis de calcaire. -Cailloutis de calcaire à matrice argileuse . -Argile avec quelque cailloutis de calcaire . -Argile brune . 	23.23	/	/
F1 (Ain chabro)	<ul style="list-style-type: none"> -Gravier . -Gravier et argile 20% . -Gravier et argile quelque % . -Gravier à matrice argileuse. -Gravier à matrice argileuse (15 à 30 %) . -Marne grise avec très peu d'argile. -Marne calcaire. -Marne avec quelque gravier. -Calcaire dur . -Calcaire (perte totale). -Argile rouge. 	62.53	/	/
YS4 b.bis (Hammamet)	<ul style="list-style-type: none"> -Galets de calcaire + matrice .argilo-sableuse . -Gros galets calcaire . -Galets calcaires avec matrice argilo-sableuse. -Gros galets calcaire. -Galets calcaires + faible matrice argileuse. -Gros galets de calcaire. -Argile + galets de calcaires. 	54.10	/	/
YS4-5 (Hammamet)	<ul style="list-style-type: none"> -Gravier de calcaire + argile -Cailloutis calcaire. -Gravier de calcaire + argile. -Cailloutis calcaire + argile. -Cailloutis et gravier, argile rare -Cailloutis + gravier, argile. -cailloutis + argile. -cailloutis + argile. -Argile. -Cailloutis + argile rare. - Argile. -Cailloutis + argile 	54.40	/	/
YS5 (Hammamet)	<ul style="list-style-type: none"> -Terre argileuse. -Galets de calcaire. -Galets de calcaire + matrice argileuse-sableuse. -Cailloutis et galets de calcaires + peu d'argile. - Cailloutis et galets de calcaires et sable+ peu d'argile. - Cailloutis et galets de calcaires et sable+ peu d'argile. -Argile avec peu de cailloutis. -Cailloutis et argile. 	46.80	20.00	11.17 x 10 ⁻³

	-Argile + quelque cailloux.			
AC1 bis	-Sol argileux , noir. -Argile pure. -Argile (60 %) avec cailloutis (40 %). -Cailloutis calcaire. -Cailloutis calcaire avec argile. -Cailloutis calcaire avec argile. -Cailloutis calcaire avec argile. -Cailloutis calcaire avec argile.	17.50	45.00	0.64×10^{-2}
F2-3 bis	-Cailloutis calcaire. -Cailloutis calcaire avec matrice argileuse.	45.19	30.00	2.3×10^{-3}
FG1 bis	-Cailloutis calcaire. -Cailloutis à matrice argileuse. - Cailloutis calcaire. -Calcaire fissuré.	42.62	44.00	4.55×10^{-3}
EF1 bis	-Cailloutis calcaire, gravier. -Cailloutis calcaire. -Argile – graveleuse. -Argile.	56.40	40.00	4.25×10^{-3}

ANNEXE 3

Tableau : Calcul de la minéralisation à partir de la conductivité [J, Rodier, 1996]

Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	Minéralisation (mg/l)
Cond, <50 $\mu\text{s/cm}$	$1,365079 \times \text{conductivité } (\mu \text{ s/cm}) \text{ à } 20^\circ\text{C}$
$50 < \text{Cond}, < 166 \mu\text{s/cm}$	$0,947658 \times \text{Conductivité}, * , (\mu\text{s/cm}) \text{ à } 20^\circ\text{C}$
$166 < \text{Cond} < 333 \mu\text{s/cm}$	$0,769574 \times \text{Conductivité}, * , (\mu\text{s/cm}) \text{ à } 20^\circ\text{C}$
$333 < \text{Cond} < 833 \mu\text{s/cm}$	$0,715920 \times \text{Conductivité } *, (\mu\text{s/cm}) \text{ à } 20^\circ\text{C}$
$833 < \text{Cond} < 10000 \mu\text{s/cm}$	$0,758544 \times \text{Conductivité } *, (\mu\text{s/cm}) \text{ à } 20^\circ\text{C}$
Cond > 10000 $\mu\text{s/cm}$	$0,850432 \times \text{Conductivité } *, (\mu\text{s/cm}) \text{ à } 20^\circ\text{C}$
* : ($\times 1,116$ pour température 25°C)	

Paramètres	Expression des résultats	Limites de qualité
A - PARAMÈTRES ORGANOLEPTIQUES		
Couleur	mg/l, échelle Pt/CO	15
Turbidité	Unités Jackson	2
Odeur	Taux de dilution : 2	0 (à 12° C)
	Taux de dilution : 3	0 (à 25° C)
Saveur	Taux de dilution : 2	0 (à 12° C)
	Taux de dilution : 3	0 (à 25° C)

B - PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES EN RELATION AVEC LA STRUCTURE NATURELLE DES EAUX

Température*	°C	25
pH** (potentiel d'hydrogène)	Unités pH	6,5 ≤ pH ≤ 9
Chlorures	mg/l Cl	200
Sulfates	mg/l SO ₄	250
Magnésium	mg/l Mg	50
Sodium	mg/l Na	150
Potassium	mg/l K	12
Aluminium total	mg/l Al	0,2
Résidus secs	mg/l après dessiccation à 180°C	1500

* Sauf en cas de traitement thermique pour la production d'eau chaude.

** Les valeurs du pH ne s'appliquent pas aux eaux conditionnées non minérales.

C - PARAMÈTRES CONCERNANT DES SUBSTANCES INDÉSIRABLES

Nitrates	mg/l NO ₃	50
Nitrites	mg/l NO ₂	0,1
Ammonium	mg/l NH ₄	0,5
Azote Kjeldhal	mg/l N, N de NO ₂ et de NO ₃ exclus	1
Oxydabilité (ou KMnO ₄ en milieu acide)	mg/l O ₂	5
Hydrogène sulfuré	mg/l	non détectable organoleptiquement
Hydrocarbures dissous ou émulsionnés (après extraction au CCl ₄)	mg/l	0,01
Phénols* (indice Phénols)	µg/l C ₆ H ₅ OH	0,5
Agent de surface (réagissant au bleu de méthylène)	mg/l (lauryl-sulfate)	0,2
Fer	mg/l Fe	0,2
Manganèse	mg/l Mn	0,05
Cuivre	mg/l Cu	1
Zinc	mg/l Zn	5
Phosphore	mg/l P ₂ O ₅	5
Fluor	mg/l F	0,7 à 1,5
Argent	mg/l Ag	0,01

* A l'exclusion des phénols naturels qui ne réagissent pas au chlore.

2. Cartographie des éléments chimiques en différent période d'observation :

